

UNIVERSITE DE OUAGADOUGOU

Ecole Doctorale
Sciences et Technologies

Laboratoire de Biologie et Ecologie Végétales



N°d'ordre.....

Thèse présentée

Par **KOULIBALY Bazoumana**

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Ouagadougou

Option Sciences appliquées

Spécialité : Agro-pédologie

**CARACTERISATION DE L'ACIDIFICATION DES
SOLS ET GESTION DE LA FERTILITE DES
AGROSYSTEMES COTONNIERS AU BURKINA**

Soutenue le 6 décembre 2011 devant le jury composé de :

Président : MILLOGO-RASOLODIMBY Jeanne, Professeur Titulaire, Université de Ouagadougou

Membres : SEDOGO P. Michel, Directeur de recherches, INERA/CNRST, Ouagadougou

ZOMBRE N. Prosper, Maître de conférences, Université de Ouagadougou (Directeur de thèse)

YAO-KOUAME Albert, Maître de conférences, Université de Cocody-Abidjan (Rapporteur)

TRAORE Ouola, Maître de Recherches, INERA/CNRST, Ouagadougou

Dédicace

Je dédie cette thèse à feu mon père Koulibaly Bamory, qui m'a appris le goût du courage, de la connaissance, et qui, malheureusement, n'a pu voir l'aboutissement de ce travail.

Remerciements

Cette thèse est l'aboutissement de longues années d'efforts que mes charges professionnelles n'ont pas facilité. En abordant la question de l'acidification des sols sur les conseils du Dr Dakuo Déhou, qui m'a conforté dans le choix de ce thème, une de mes préoccupations était de tirer les enseignements pratiques de l'étude système de culture de Boni, implanté en 1982. Dans cette approche, j'étais très motivé à l'idée d'attaquer l'un des handicaps majeurs de la production dans les systèmes de culture coton-céréales. Je voudrais lui témoigner ma profonde gratitude et le remercier pour sa constance, son soutien au plan scientifique, ses conseils et encouragements tout au long de ce travail.

Mes remerciements s'adressent au Professeur Guinko Sita, qui a bien voulu m'accepter dans son laboratoire de Biologie et Ecologie Végétales et me permettre d'accomplir cette formation.

Je voudrais très sincèrement remercier mon Directeur de thèse, le Professeur Zombré N. Prosper pour son encadrement, ses conseils et surtout, ses orientations dont j'ai constamment bénéficié depuis mes travaux de DEA et ceux de la présente thèse, qu'il a bien voulu diriger. Malgré ses charges académiques et responsabilités administratives, il s'est particulièrement investi en m'appuyant dans les travaux de terrain, dans la préparation et la correction des articles parus dans les revues scientifiques et dans la rédaction de cette thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma très profonde gratitude.

Le Professeur Traoré Ouola, mon responsable scientifique, en sa qualité de Chef de Programme Coton, m'a beaucoup soutenu et encouragé durant ces années. Il a énormément contribué, avec toute la rigueur scientifique, à la conception, à la rédaction des articles scientifiques et à la correction de cette thèse. Son souhait était que je puisse la défendre au plus vite, sans attendre la veille de ma retraite. Je le remercie beaucoup pour son engagement qui a été déterminant dans ce travail.

Mes remerciements s'adressent aux imminents professeurs que j'ai eus l'honneur d'avoir comme membres du jury de thèse. Il s'agit de :

- Professeur Millogo Rasolodimby Jeanne, enseignante à l'Université de Ouagadougou, du Laboratoire de biologie et écologie végétales qui, malgré ses multiples charges, a accepté de présider le jury de cette thèse,
- Professeur Yao-Kouamé Albert, Enseignant à l'Université de Cocody, qui a corrigé cette thèse, a accepté d'en rédiger le rapport, et d'être membre du jury.
- Professeur Sédogo Michel, Enseignant et chercheur à l'INERA, pour avoir accepté de participer au jury d'examen de ce travail.

Je remercie le Professeur Pallo J.P François et le Professeur Nacro Hassan Bismarck, pour avoir accepté de rédiger les rapports de cette thèse.

Il m'est agréable de remercier le Professeur Gnissa Konaté qui, en sa qualité de Directeur de l'INERA, m'a beaucoup encouragé et a été particulièrement attentif, par son implication personnelle, à mon engagement à la fonction publique. Je voudrais le remercier et lui témoigner toute ma reconnaissance.

Durant ces années d'études, j'ai eu à bénéficier de plusieurs contributions et, à ce titre, je tiens à remercier très sincèrement :

- le Délégué Général du CNRST, ainsi que le Directeur de l'INERA, qui ont bien voulu autoriser la présente formation ;
- Professeur Lompo François, Maître de recherches, Directeur de l'INERA, pour ses encouragements tout au long de mes travaux ;
- Professeur Dabiré/Binso Clémentine, Maître de recherches, Chef de Département Productions Végétales de l'INERA, pour ses encouragements ;
- Dr Sanou Jacob, Directeur Régional du Centre de Recherches Environnementales et Agricoles de l'ouest, pour sa disponibilité, ses conseils et ses encouragements ;
- Dr Karim Traoré, Chef de Programme Coton, pour sa grande disponibilité et sa contribution aux analyses de sol réalisées au laboratoire GRN/SP, ainsi que son technicien Ouattara Amoro, dit « Docteur », pour son assiduité et son engagement aux travaux de laboratoire ;
- Professeur Assimi Salawu, pour la contribution de son laboratoire aux analyses biologiques des sols ;
- Professeur Hien Victor, pour son appui scientifique durant mes travaux de DEA, ses conseils et encouragements tout au long des travaux de cette thèse ;
- Dr Zomboudré Georges, pour son soutien constant, son appui, ses conseils, ses encouragements et sa disponibilité ;
- Sawadogo Moussa, Directeur du laboratoire du Bunasols et Paré Tidiani « Ladjé », pour leur accompagnement et leur appui aux analyses réalisées au Bunasols.

Je voudrais remercier vivement tous mes collègues chercheurs du Programme Coton, en particulier Héma Omer, pour tous ses encouragements, Sanfo Denys, Somé Hugues, Vognan Gaspard, Ouattara Marc, mon collègue de bureau et « Roi des Toussians », Zagré Blaise, Ouattara Delphine, Sow Issa et Traoré Adama, pour leur disponibilité et leur accompagnement multiforme, qui ont été précieux pour moi tout au long de ce travail.

La collecte des données et le suivi des expérimentations ont impliqué tout le personnel technique du Programme Coton que je remercie vivement, en particulier Béré G. Michel, Seri

Moussa le « Doyen », Zébré Soumtoudo, Sessouma Begué, Barry Seydou, Koné Zacharie, Kamissogo Boureima, Traoré Adama Dabarou, Souaré Bakary, Ouédraogo Boukary. J'ai une pensée particulière pour Feu Dabiré Etienne, qui nous a quittés prématurément en Octobre 2008, et que je remercie pour son engagement et son dévouement dans les travaux de terrain et de laboratoire.

Pour leur contribution à l'étude système de culture, depuis sa mise en place en 1982, je remercie vivement tous les chefs d'équipe (Samaké Siaka, Sow Issa, Sow Boulaye, Kambiré Dafra) et les techniciens de la ferme de Boni à savoir, Homboué Raoul, Gnoumou Barthélemy, Kani René, Boué Bézazan et Sangaré Dramane.

Je remercie également les stagiaires, Bondé Désiré, Pouya Thierry, Lalsaga Roland, pour leur contribution à ce travail, ainsi que Mandé Boubacar, pour son assistance.

Je remercie le secrétariat, Mme Sanou/Dougouri Alidiata Rita, Mme Somé/Dah Irène et « Ma très chère » Ivonne Loboué, pour leur appui constant.

La SOFITEX a toujours été disponible et très sensible aux questions de recherche par son appui constant à la conduite de l'étude de longue durée sur la ferme de Boni. Je voudrais remercier M. Tiendrébéogo Célestin, ancien Directeur Général de la SOFITEX, pour toute son attention à la Recherche cotonnière, ainsi que Yaméogo Georges, Directeur du Développement de la Production Cotonnière et tous ses collaborateurs. Je remercie également tous les partenaires de la filière coton, notamment la SOCOMA et FASO COTON, ainsi que l'Union Nationale des Producteurs de Coton du Burkina (UNPC-B).

Il m'est agréable de remercier Ouédraogo Issoufou, pour ses conseils et ses encouragements qui ont permis l'aboutissement de ce travail.

Mon épouse Bintou m'a apporté beaucoup de réconfort et a bien voulu accepté mes absences de la maison tout au long de ce travail. Cette thèse est le fruit de nos efforts.

Je ne saurai oublier les nombreuses personnes qui, d'une manière ou d'une autre, de loin ou de près, ont contribué à la réalisation de ce travail. Je voudrais remercier tous mes parents et amis, qui m'ont beaucoup soutenu durant ces longues années. Je dis grand merci à Tou Yacouba et toute sa famille, pour son amitié, sa fraternité, pour tout le soutien et le réconfort dont j'ai toujours bénéficié de sa part. J'ai une pensée pour Kologo Francis et toute sa famille que je remercie de tout mon cœur, pour ses encouragements et toute son amitié.

A tous, je dis Merci.

TABLE DES MATIERES

Pages

Dédicace	i
Remerciements	ii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	xi
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES ANNEXES.....	xv
Résumé	xvi
Abstract	xvii

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

PREMIERE PARTIE

CHAPITRE 1. PRESENTATION DE LA ZONE COTONNIERE DU BURKINA FASO	4
1.1.Principales caractéristiques de la zone cotonnière du Burkina Faso	4
1.1.1.Sols du Burkina Faso et de la zone cotonnière	4
1.1.2.Climat	5
1.1.2.1. Pluviométrie.....	6
1.1.2.2. Températures	7
1.1.3.Végétation naturelle.....	7
1.1.4. Relief et hydrographie	8
1.1.5. Contexte géologique	8
1.2. Systèmes de culture coton-céréales et fertilité des sols	8
1.1.1. Typologie des exploitations.....	9
1.1.2. Systèmes de culture	9
1.2. Effets de la fertilisation du cotonnier sur la fertilité des sols en zone cotonnière	10
1.2.1. Evolution des formules de fertilisation en culture cotonnière	10
1.2.2. Effet de la fertilisation minérale dans les systèmes de culture	12
2.1. Acidification des sols et conséquences sur les systèmes de culture à base de coton	14
2.1.1. Principales causes de l'acidification des sols	14
2.1.2. Dégradation de la fertilité et acidification par la mise en culture des sols	15
2.1.3. Effets de la fertilisation minérale sur l'acidification des sols cultivés	16
2.1.4. Acidification des sols par le déficit de restitutions organiques	18
2.1.5. Influence de l'acidité sur les propriétés du sol	18
2.1.5.1. Effet de l'acidité sur l'état physique du sol	19
2.1.5.2. Action de l'acidité sur l'activité biologique du sol.....	20

2.1.5.3. Effet de l'acidité sur l'état chimique du sol.....	20
2.1.5.3.1. Capacité d'échange cationique (CEC).....	21
2.1.5.3.2. Action de l'acidité du sol sur la disponibilité des éléments	22
2.1.5.4. Action de l'acidité sur l'absorption des éléments par la plante.....	22
2.1.5.5. Effets de l'acidité sur les cultures et les rendements	23
2.2. Correction de l'acidité du sol.....	24

DEUXIEME PARTIE

CHAPITRE 3. SITES D'ETUDE, MATERIEL ET METHODES.....	27
3.1. Sites d'étude	27
3.1.1. Sites en milieu semi-contrôlé.....	28
3.1.1.1. Station de Farako-bâ.....	28
3.1.1.2. Ferme expérimentale SOFITEX de Boni	28
3.1.2. Sites en milieu paysan.....	29
3.1.2.1. Site de Boni	29
3.1.2.2. Site de Dohoun	30
3.1.2.3. Site de Balla.....	30
3.2. Matériel d'étude.....	30
3.2.1. Matériel végétal	30
3.2.1.1. Cotonnier	30
3.2.1.2. Maïs	31
3.2.1.3. Sorgho.....	31
3.2.2. Amendements	31
3.2.3. Engrais minéraux	33
3.3. Méthodes d'étude	33
3.3.1. Caractérisation de l'acidification sur trois types de sols en zone cotonnière Ouest du Burkina Faso.....	33
3.3.1.1. Facteurs étudiés	33
3.3.1.1.1. Types de sols étudiés	33
3.3.1.1.2. Modes d'exploitation des terres.....	33
3.3.1.2. Evaluation de l'acidification par les prélèvements de sol	34
3.3.1.3. Evaluation de l'acidification du sol par l'étude pédologique	34
3.3.1.4. Paramètres déterminés	35
3.3.2. Effet des amendements calco-magnésiens locaux sur l'acidité, les propriétés chimiques et biologiques du sol.....	35
3.3.2.1. Dispositif expérimental.....	35
3.3.2.2. Conduite des travaux	36
3.3.2.3. Paramètres mesurés	37

3.3.2.3.1. Caractéristiques physico-chimiques des sols des sites d'étude	37
3.3.2.3.2. Nutrition minérale des cultures en station de recherche.....	37
3.3.2.3.3. Evaluation des rendements sur les sites d'étude.....	38
3.3.2.3.4. Bilans culturaux en station de recherche	38
3.3.2.3.5. Activité microbienne du sol.....	38
3.3.3. Etude de l'effet de la gestion des résidus de récolte sur l'acidification du sol dans un système de rotation coton-maïs-sorgho	39
3.3.3.1. Historique de l'étude	39
3.3.3.2. Dispositif expérimental.....	39
3.3.3.2.1. Modes de gestion des résidus de récolte.....	40
3.3.3.2.2. Fertilisation des cultures	41
3.3.3.3. Conduite des travaux	41
3.3.3.4. Paramètres mesurés	42
3.3.3.4.1. Caractéristiques chimiques des sols	42
3.3.3.4.2. Suivi de la nutrition minérale des cotonniers	43
3.3.3.4.3. Rendements des cultures	43
3.3.3.4.4. Bilan cultural	43
3.3.4. Méthodes des analyses de laboratoire	43
3.3.4.1. Analyses physico-chimiques des sols.....	44
3.3.4.2. Analyses biologiques des sols	45
3.3.4.3. Analyses de végétaux	46
3.3.5. Traitement statistique des données	46

TROISIEME PARTIE

CHAPITRE 4. CARACTERISATION DE L'ACIDITE DE TROIS TYPES DE SOL EN ZONE COTONNIERE OUEST DU BURKINA FASO.....	47
4.1. Description des caractéristiques morphologiques des sols.....	47
4.2. Effets des modes d'exploitation des terres sur la granulométrie et les réserves en éléments totaux des sols	49
4.2.1. Composition granulométrique et acidification des sols.....	49
4.2.2. Effet de l'exploitation des terres sur les réserves en éléments totaux et l'acidification du sol	51
4.2.2.1. Phosphore et potassium totaux	51
4.2.2.2. Calcium et magnésium totaux	52
4.2.2.3. Fer et manganèse totaux	54
4.3. Diagnostic de l'acidification des sols par les effets de l'exploitation des terres	55
4.3.1. Relation entre l'évolution de quelques paramètres chimiques et l'acidification des sols	55
4.3.2. Evolution des bases échangeables et de la saturation du complexe adsorbant.....	57
4.3.2.3. Bases échangeables des sols ferrallitiques (ferralsols)	59
4.3.2.4. Saturation du complexe adsorbant.....	60
4.3.3. Evolution de la capacité d'échange cationique (CEC) des sols.....	61
4.3.4. Corrélation entre la CEC et le carbone organique	62
4.4. Effets des modes d'exploitation des terres sur la réaction des sols	64
4.4.1. Evolution du pH des sols bruns eutrophes (cambisols).....	64
4.4.2. Réaction des sols ferrugineux (lixisols).....	65
4.4.3. Réaction des sols ferrallitiques (ferralsols)	66
4.4.4. Effets des modes d'exploitation des sols sur l'acidité et l'aluminium échangeable ..	67
4.4.5. Corrélations entre pH et bases échangeables du sol	68
4.5. Discussion.....	69
4.5.1. Description des caractéristiques morphologiques des sols.....	69
4.5.2. Effet des modes d'exploitation des terres sur la granulométrie et l'acidification des sols	70
4.5.3. Evolution des éléments totaux et acidification des sols	70
4.5.4. Evolution du carbone et de l'azote sur l'acidification des sols	71
4.5.5. Evolution des bases échangeables et de la saturation du complexe adsorbant.....	72
4.5.6. Acidification des sols par l'évolution de la CEC	73
4.5.7. Effets des modes d'exploitation des terres sur la réaction des sols	75
Conclusion.....	76

CHAPITRE 5. EFFET DES AMENDEMENTS CALCO-MAGNESIENS LOCAUX SUR L'ACIDITE, LES PROPRIETES CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DES SOLS	77
5.1. Nutrition minérale des cultures en station de recherche à Farako-bâ sur un sol ferrugineux (lixisol) acide	77
5.1.1. Nutrition minérale du cotonnier	77
5.1.2. Nutrition minérale du maïs	78
5.1.3. Nutrition minérale du sorgho.....	79
5.2. Effets des amendements sur les rendements en sols acides.....	80
5.2.1. Rendements des cultures en station de recherche à Farako-bâ.....	80
5.2.2. Rendements des cultures sur les sites en milieu paysan.....	81
5.3. Effets des amendements sur les bilans culturaux et sur l'acidification du sol	82
5.3.1. Exportations d'éléments minéraux par les résidus de récolte.....	82
5.3.2. Evaluation des exportations minérales par le coton graine et les grains de maïs et de sorgho	83
5.3.3. Bilans culturaux d'une rotation coton-maïs-sorgho et acidification du sol.....	85
5.4. Effet des amendements sur les propriétés chimiques des sols sur les sites en milieu paysan	86
5.4.1. Efficacité des amendements sur l'acidité du sol brun eutrophe	86
5.4.2. Efficacité des amendements sur l'acidité du sol ferrugineux	87
5.4.3. Efficacité des amendements sur l'acidité du sol ferrallitique (ferralsol).....	88
5.5. Effets des amendements sur l'activité biologique et l'acidification des sols	89
5.5.1. Effets des amendements sur l'activité respiratoire des sols du site en station de recherche.....	89
5.5.2. Effets des amendements sur l'activité biologique des sols des sites en milieu paysan ..	91
5.5.2.1. Evolution du cumul de C-CO ₂ dégagé	91
5.5.2.2. Evolution de la biomasse microbienne des sols	93
5.5.2.3. Effets des amendements sur la minéralisation du carbone	94
5.6. Discussion.....	94
5.6.1. Efficacité des amendements sur la nutrition minérale.....	94
5.6.2. Effets des fumures sur les rendements	96
5.6.3. Evolution de l'activité respiratoire du sol en station de recherche.....	98
5.6.4. Evolution de l'activité biologique des sols issus des sites en milieu paysan	98
Conclusion.....	100

CHAPITRE 6. ETUDE DE L’EFFET DE LA GESTION DES RESIDUS DE RECOLTE SUR L’ACIDIFICATION DU SOL DANS UN SYSTEME DE ROTATION COTON-MAÏS-SORGHO	101
6.1. Effets de la gestion des résidus de récolte sur l’acidification du sol et la nutrition minérale	101
6.1.1. Effets de la gestion des résidus de récolte sur la nutrition minérale des cotonniers. 101	
6.1.2. Effets de la gestion des résidus de récolte et des fumures sur les rendements des cultures	105
6.1.3. Effets de la gestion des résidus de récolte sur les bilans culturaux	108
6.2. Evolution des propriétés chimiques du sol sous différents modes de gestion des résidus de récolte.....	111
6.2.1. Evolution du carbone et de l’azote sur l’acidification du sol	111
6.2.2. Evolution des teneurs en phosphore du sol	113
6.2.3. Evolution des bases échangeables et de la CEC du sol	114
6.2.4. Effet de la gestion des résidus de récolte sur l’évolution du pH du sol.....	116
6.3. Discussion.....	117
6.3.1. Effets de la gestion des résidus de récolte sur la nutrition minérale des cotonniers. 117	
6.3.2. Effets de la gestion des résidus de récolte et des fumures sur les rendements des cultures	118
6.3.3. Effets de la gestion des résidus de récolte sur les bilans culturaux	118
6.3.4. Evolution des propriétés chimiques du sol sous différents modes de gestion des résidus de récolte	119
Conclusion	122
CONCLUSION GENERALE	124
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	127
ANNEXES.....	141

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

BP : Burkina Phosphate

BUNASOLS : Bureau National des Sols

CEC : Capacité d'Echange Cationique

CIRAD : Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement

C/N : Carbone/Azote

CPCS : Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols

COVEMI : Compagnie Villageoise d'Exploitation Minière

FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)

GRN/SP : Gestion des Ressources Naturelles et Systèmes de Production

HA : Hectare

INERA : Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles

JAS : Jours Après Semis

K : potassium

P : phosphore

pH : potentiel Hydrogène

SBE : Somme des Bases Echangeables

SOFITEX : Société Burkinabé des Fibres Textiles

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tableau I. Composition chimique des roches-mères des sols étudiés.....	29
Tableau II. Composition chimique des composts utilisés en station de recherche et en milieu paysan	32
Tableau III. Caractéristiques chimiques du compost et du fumier issus du recyclage des tiges de sorgho.....	32
Tableau IV. Traitements comparés	35
Tableau V. Engrais minéraux appliqués sur cotonnier et sur sorgho	41
Tableau VI. Fertilisation appliquée sur le maïs selon les modes de gestion des résidus	41
Tableau VII. Morphologie des sols bruns eutrophes (cambisols) du site de Boni.....	47
Tableau VIII. Morphologie des sols ferrugineux (lixisols) du site de Dohoun	48
Tableau IX. Morphologie des sols ferrallitiques (ferralsols) du site de Balla.....	49
Tableau X. Granulométrie des sols bruns eutrophes (cambisols), ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols) (2007)	50
Tableau XI. Teneurs en phosphore et en potassium des sols	51
Tableau XII. Teneurs en fer et en manganèse des sols	54
Tableau XIII. Teneurs en carbone, en azote et rapport C/N des sols bruns eutrophes (cambisols).....	55
Tableau XIV. Teneurs en carbone, en azote total et rapport C/N des sols ferrugineux (lixisols).....	56
Tableau XV. Teneurs en carbone, en azote total et rapport C/N des sols ferrallitiques (ferralsols)	56
Tableau XVI. Teneurs en carbone des sols sur 0-60 cm.....	57
Tableau XVII. Bases échangeables et SBE des sols bruns eutrophes (cambisols) du site de Boni.....	58
Tableau XVIII. Bases échangeables des sols ferrugineux (lixisols) du site de Dohoun.....	58
Tableau XIX. Bases échangeables et SBE des sols ferrallitiques (ferralsols) du site de Balla.....	59
Tableau XX. Taux de saturation du complexe adsorbant des sols étudiés.....	60
Tableau XXI. Taux de saturation des sols sur 0-60 cm	60
Tableau XXII. Capacité d'échange cationique des sols étudiés.	61
Tableau XXIII. Capacité d'échange cationique des sols sur 0-60 cm	62
Tableau XXIV. pH eau et pH KCl des sols bruns eutrophes (cambisols) de Boni	64
Tableau XXV. pH et acidité d'échange (Al^{3+} et H^+) des sols bruns eutrophes (cambisols).....	65
Tableau XXVI. pH eau et pH KCl des sols ferrugineux (lixisols) de Dohoun	65
Tableau XXVII. pH et acidité d'échange (Al^{3+} et H^+) des sols ferrugineux (lixisols).....	66
Tableau XXVIII. pH eau et pH KCl des sols ferrallitiques (ferralsols) de Balla	66
Tableau XXIX. pH et acidité d'échange (Al^{3+} et H^+) des sols ferrallitiques (ferralsols)	67
Tableau XXX. pH eau des sols sur 0-60cm	67
Tableau XXXI. Teneurs en aluminium échangeable des sols.....	68

	Pages
Tableau XXXII. Evolution des teneurs en azote et en phosphore des cotonniers à 30, 45 et 60 jours après semis (année 2004).....	77
Tableau XXXIII. Evaluation de la nutrition des cotonniers par les fonctions de production en azote F(N), en phosphore F(P), en potassium F(K) et en soufre F(S) à 70 jours après les semis (2004)	78
Tableau XXXIV. Evolution des teneurs en azote, en phosphore et en potassium du maïs à 60 et 80 jours après semis (année 2005).....	79
Tableau XXXV. Teneurs en azote, en phosphore, en potassium et en soufre des feuilles de sorgho à 60 jours après semis (année 2006).....	79
Tableau XXXVI. Rendements des cultures en station de recherche à Farako-bâ (2004 à 2006)	80
Tableau XXXVII. Rendements en coton graine et maïs grain à Boni, Dohoun et Balla.	81
Tableau XXXVIII. Evaluation des exportations minérales par les tiges des cultures à Farako-bâ	82
Tableau XXXIX. Exportations minérales par le coton graine et les grains de maïs et de sorgho grain à Farako-bâ	83
Tableau XL. Exportations cumulées d'éléments minéraux dans une rotation triennale coton-maïs-sorgho (2004-2006)	84
Tableau XLI. Bilans culturaux en azote, en phosphore, en potassium et en soufre d'une rotation triennale coton-maïs-sorgho (Farako-bâ)	85
Tableau XLII. Evolution des caractéristiques chimiques du sol brun eutrophe (cambisol) de Boni sur 0-20 cm	87
Tableau XLIII. Evolution des caractéristiques chimiques du sol ferrugineux (lixisol) de Dohoun sur 0-20 cm	87
Tableau XLIV. Evolution des caractéristiques chimiques du sol ferrallitique (ferralsol) de Balla sur 0-20 cm	88
Tableau XLV. Evolution du carbone de la biomasse microbienne en 2007	93
Tableau XLVI. Minéralisation du carbone en 2007	94
Tableau XLVII. Teneurs en éléments minéraux (N, P, K et S) des feuilles de cotonnier prélevées à 70 jours après les semis.	103
Tableau XLVIII. Teneurs en éléments minéraux secondaires (Ca, Mg, Na, Cl et B) des feuilles de cotonnier prélevées à 70 jours après les semis.	104
Tableau XLIX. Evolution des rendements des cultures en fonction de la durée de mise en culture des terres et des modes de gestion des résidus de récolte.....	105
Tableau L a. Bilan cultural en azote en fonction des modes de gestion des résidus de récolte en 25 années d'exploitation des terres.....	108
Tableau L b. Bilan cultural en phosphore en fonction des modes de gestion des résidus de récolte en 25 années d'exploitation des terres	109
Tableau L c. Bilan cultural en potassium en fonction des modes de gestion des résidus de récolte en 25 années d'exploitation des terres.....	110
Tableau L d. Bilan cultural en soufre en fonction des modes de gestion des résidus de récolte en 25 années d'exploitation des terres.....	111

Tableau LI. Evolution des teneurs en carbone en 25 années d'exploitation des terres sous différents modes de gestion des résidus de récolte (horizon 0-20 cm).....	112
Tableau LII. Evolution des teneurs en azote des sols sous différents modes de gestion des résidus de récolte dans l'horizon 0-20cm	113
Tableau LIII. Evolution des teneurs en P assimilable et en phosphore total des sols	113
Tableau LIV. Evolutions des réserves en bases échangeables et de la capacité d'échange cationique en 25 années d'exploitations des terres	115
Tableau LV. Evolution du pH eau, du pH KCl et du Δ pH en 25 ans de mise en culture des sols	116

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte des sols du Burkina Faso	5
Figure 2. Zones climatiques du Burkina Faso	6
Figure 3. Zones cotonnières du Burkina Faso	10
Figure 4. Quantités d'engrais minéraux utilisés et superficies en coton de 1999 à 2006 au Burkina Faso	12
Figure 5. Localisation des sites d'étude.....	27
Figure 6. Pluviométrie et nombre de jours de pluie à Boni de 1982 à 2006	28
Figure 7. Corrélations entre le calcium total et le pH eau (a) et entre le magnésium total et le pH eau (b) sur les sols bruns eutrophes (cambisols)	53
Figure 8. Corrélations entre le calcium total et le pH eau (a) et entre le magnésium total et la CEC (b) sur les sols ferrugineux (lixisols).....	53
Figure 9. Corrélations entre le calcium total et le pH eau (a) et entre le magnésium total et la CEC (b) sur les sols ferrallitiques (ferralsols).....	53
Figure 10. Corrélation entre la CEC et le carbone total sur les sols bruns eutrophes (cambisols) du site de Boni	63
Figure 11. Corrélation entre la CEC et le carbone total sur les sols ferrugineux (lixisols) du site de Dohoun	63
Figure 12. Corrélation entre la CEC et le carbone total sur les sols ferrallitiques (ferralsols) du site de Balla	64
Figure 13. Evolution cumulée de C-CO ₂ (mg 100 g ⁻¹ de sol) sur les sols prélevés a) 1 jour, b) 50 jours et c) 120 jours après les apports d'amendements	90
Figure 14. Evolution du cumul de C-CO ₂ dégagé sur le sol brun eutrophe (cambisol) en fonction des amendements (site de Boni)	91
Figure 15. Evolution du cumul de C-CO ₂ dégagé sur le sol ferrugineux (lixisol) en fonction des amendements (site de Dohoun)	92

Figure 16. Evolution du cumul de C-CO ₂ dégagé sur le sol ferrallitique (ferralsol) en fonction des amendements (site de Balla).....	92
Figure 17. Evolution des fonctions de production des cotonniers en azote (a), phosphore (b), potassium (c) et soufre (d) selon les modes de gestion des résidus de récolte de 1982 à 1998	102
Figure 18. Evolution des rendements du coton en fonction de la durée de mise en culture des terres et des modes de gestion des résidus de récolte	106
Figure 19. Evolution des rendements du maïs en fonction de la durée de mise en culture des terres et des modes de gestion des résidus de récolte	107
Figure 20. Evolution des rendements du sorgho en fonction de la durée de mise en culture des terres et des modes de gestion des résidus de récolte	107

LISTE DES ANNEXES

	Pages
ANNEXE 1. Caractéristiques physico-chimiques et hydriques du sol avant les apports des amendements (Farako-bâ, 2004)	141
ANNEXE 2. Pluviométrie et nombre de jours de pluie par an à Boni de 1982 à 2006.	142
ANNEXE 3. Description morphologique des sols bruns eutrophes (cambisols) de Boni	143
ANNEXE 4. Description morphologique des sols ferrugineux tropicaux (lixisols) de Dohoun	145
ANNEXE 5. Description morphologique des sols ferrallitiques (ferralsols) de Balla.....	148
ANNEXE 6. Teneurs en calcium et en magnésium des sols	151
ANNEXE 7. Corrélations entre les variables chimiques des sols bruns eutrophes (cambisols) du site de Boni	152
ANNEXE 8. Corrélations entre les variables chimiques des sols ferrugineux (lixisols) du site de Dohoun	153
ANNEXE 9. Corrélations entre les variables chimiques des sols ferrallitiques (ferralsols) du site de Balla	154
Liste des publications tirées de la thèse.	155

Résumé

Le système de production à base de coton et de céréales est affecté par l'acidification du sol au Burkina Faso. Afin d'élucider ce problème, un diagnostic des facteurs d'acidification a été réalisé sur trois types de sol. Les amendements appliqués sur ces sols pour lutter contre l'acidification ont été évalués pour leur efficacité sur la nutrition minérale et les rendements, ainsi que leurs effets sur les propriétés chimiques et biologiques du sol. Les effets de la gestion des résidus de récolte sur l'acidification du sol ont été étudiés à partir d'un essai de longue durée (1982 à 2006), dans une rotation triennale coton-maïs-sorgho.

La mise en culture des terres est le principal facteur de l'acidification du sol à laquelle les sols ferrallitiques (ferralsols) et les sols ferrugineux (lixisols), chimiquement pauvres et fragiles, sont plus sensibles que les sols bruns eutrophes (cambisols). A l'opposé de la jachère, l'exploitation des terres entraîne une baisse des teneurs en carbone, celle des réserves en bases échangeables, une forte désaturation du complexe adsorbant et une diminution de la CEC. Cette dégradation chimique du sol l'expose à une acidification qui demeure plus intense en culture motorisée qu'en culture attelée.

Les amendements en compost, en dolomie et en Burkina phosphate, apportés à des doses respectives de 6 ; 1,5 et 0,3 t ha⁻¹, combinés à la fertilisation minérale, ont amélioré les rendements sans influencer la nutrition minérale des cultures ni le pH du sol. En trois années d'exportation des résidus de récolte, les bilans culturaux sont déficitaires en azote et en potassium, et conduisent à un appauvrissement, suivi d'une acidification du sol. La baisse de la SBE et de la CEC amorcée après deux années de culture en milieu paysan confirme cette tendance, et ce, malgré l'apport des amendements.

Dans une rotation coton-maïs-sorgho, le recyclage des résidus de récolte en compost ou en fumier, associé à la fumure minérale, a été efficace pendant 17 années sur la nutrition du cotonnier peu affecté par l'acidification du sol. La durée de mise en culture des terres entraîne une baisse des rendements 2 à 3 fois plus importante, avec l'exportation des résidus de récolte. En 25 ans d'exploitation continue des terres, les propriétés chimiques du sol (carbone, P total, SBE et CEC) chutent de façon sensible. Cette dégradation du sol et l'acidification qui en résulte sont atténuées par le recyclage des résidus de récolte. L'étude recommande une gestion intégrée des résidus de récolte et l'utilisation de phosphate naturel ou de dolomie, pour prévenir l'acidification du sol et assurer la durabilité des systèmes de culture coton-céréales.

Mots-clés : acidification, dégradation, amendement, rendement, bilans culturaux, fertilité du sol, système de culture coton-céréales, recyclage des résidus de récolte, Burkina Faso.

Characterization of soils acidification in the management of fertility in cotton growing agrosystems of Burkina Faso

Abstract

Production system based on growing cotton and cereals is affected by soil acidity in Burkina Faso. For a best understanding of this phenomenon, a diagnosis of acidification factors has been undertaken on three types of soils. Local amendments used to mitigate soil acidity were evaluated for their efficiency on nutrients uptake, crops yields and their effects on soil chemical and biological properties. The effect of crop-residues management on soil acidity was analysed through a long-term experiment in a cotton-maize-sorghum rotation system.

Continuous cultivation of the land is the main factor of soil acidification mostly for the ferralsols and lxisols with low chemical fertility level than cambisols. In opposite to the fallow, land cultivation leads to the decrease of soil carbon content, exchangeable bases and to the leaching of cation exchange capacity. This degradation of soil chemical properties leads to its acidification that is enhanced by the mechanization of ploughing material.

Compost, dolomite and Burkina phosphate rock amendments applied at the rate of 6, 1.5 and 0.3 t ha⁻¹ respectively and combined to the mineral fertilization improved more yields than plants nutrition uptake and soil pH. Three years of removing crop residues out of the field leads to a mineral balance deficit for N and K and an increase of soil degradation and its acidification. After two years cropping, the decrease of the SEB and CEC confirms the decline of soil fertility while using amendments or not.

Recycling crop residues to compost or manure and combining it with mineral fertilizer has been efficient during 17 years on cotton plants nutrition that was not affected by soil acidity. Continuous cropping led to a decrease crops yields that is more important with the exportation of crops residues out of the field. After 25 years of continuous cultivation, soil acidification due to the decline of its chemical properties (C, SEB and CEC) was weak while using compost or manure derived from crop residues. This study recommends integrated crop residues management in combination with dolomite and rock phosphate for a sustainable cotton-cereals rotation system and prevents soil from acidification.

Key-words: acidification, degradation, amendment, yield, nutrients uptake, soil fertility, cotton and cereals growing system, recycling of crop residues, Burkina Faso.

INTRODUCTION GENERALE

La dégradation de la fertilité des sols cultivés est un véritable frein à la production agricole. Cette dégradation des sols, dans les zones cotonnières du Burkina Faso, est susceptible de compromettre la durabilité des systèmes de production. Pourtant, le coton, principale culture de rente, est une importante source de revenu pour les producteurs, et une source de devises pour le pays, avec plus de 60% des recettes d'exportation (OCDE, 2006 ; Hauchart, 2006). Le coton est cultivé sur plus de 250 000 exploitations par plus de 325 000 producteurs et il assure une relative intensification des systèmes de culture à base de cotonnier et de céréales (CSAO, 2005 ; AICB, 2008). Au cours de la dernière décennie, l'on a enregistré une augmentation constante et spectaculaire de la production cotonnière, qui a atteint un record de 715 000 tonnes de coton graine en 2005 (AFD, 2007).

L'accroissement de la production cotonnière, lié surtout à l'extension des superficies cultivées, n'est pas envisageable sur le long terme (Traoré *et al.*, 2007a), à cause de la démographie galopante, qui accentue la pression sur le foncier (Somé *et al.*, 2007) et de la baisse de l'efficacité des engrais minéraux, du fait de la dégradation de la fertilité des sols. Malgré une utilisation croissante des engrais minéraux, les rendements du coton stagnent et diminuent d'une année à l'autre, depuis plus d'une décennie. Cette baisse des rendements en coton graine est susceptible de mettre en cause la rentabilité du coton, qui est pourtant la principale source de devises du pays. Dans la zone cotonnière ouest du Burkina Faso, la mise en culture des sols se traduit par une perte annuelle de 2 à 4% de la matière organique, pour atteindre le seuil de non réponse aux engrais minéraux, après douze à quinze ans de culture continue (Berger *et al.*, 1987; Dakouo, 1991 ; Hien *et al.*, 1994). La durabilité des systèmes de culture exige une gestion rationnelle de la fertilité des sols, qui est loin d'être assurée à cause de l'insuffisance des restitutions organiques (Ouédraogo *et al.*, 2006).

Le cotonnier est pourtant très sensible à cette dégradation de la fertilité des sols, qui se traduit par l'apparition généralisée des symptômes de déficiences minérales (Girma *et al.*, 2007). Les carences potassiques apparaissent au bout de 6 à 7 ans sur les sols ferrugineux (lixisols), et seulement après 4 ans sur les sols ferrallitiques (ferralsols) (Dakouo, 1994). La nutrition minérale du cotonnier, notamment en azote, en phosphore et en potassium, constitue un facteur déterminant de la production et de la qualité de la fibre (Crozier *et al.*, 2004 ; Reiter *et al.*, 2008). Il est donc nécessaire de bien gérer la fertilité des sols et d'ajuster la fertilisation aux besoins des plantes en vue de la rentabilité économique et de la durabilité des systèmes de culture coton-céréales (Vanlauwe *et al.*, 2005).

Au Burkina Faso, la culture cotonnière, pratiquée essentiellement sur les sols ferrugineux tropicaux (lixisols), ferrallitiques (ferralsols) et bruns eutrophes (cambisols), est le plus souvent indexée comme étant la principale cause d'appauvrissement des sols. Pourtant, toute surexploitation des terres se traduit par une baisse de la teneur en matière organique (Soumaré *et al.*, 2000 ; Ouattara *et al.*, 2006), une dégradation de la structure du sol, favorisant l'érosion, et un pH plus bas, ce qui diminue davantage la capacité de ces terres à produire (Piéri, 1989 ; Deckers, 1993). Dans un tel contexte, l'analyse de l'évolution de l'acidité des sols, en relation avec les modes d'exploitation des terres, paraît indispensable afin d'orienter la fertilisation en zone cotonnière.

La valorisation des résidus de récolte peut contribuer de façon déterminante à assurer le maintien de la fertilité des sols cultivés (Malhi *et al.*, 2006 ; Benjamin *et al.*, 2010). C'est pourquoi Berger *et al.* (1987) ont proposé l'enfouissement direct des résidus au sol ou leur restitution sous forme de fumure organique pour maintenir la fertilité des sols cultivés. D'autres travaux précisent que le recyclage des résidus ou leur incorporation au sol, combiné aux techniques de travail du sol et aux rotations des cultures, améliore certaines propriétés du sol tout en réduisant les phénomènes d'érosion (Blair *et al.*, 2006 ; Wei *et al.*, 2006). Pourtant, dans les systèmes de production à base de coton et de céréales, les résidus de récolte sont brûlés ou pâturés, ce qui occasionne souvent des bilans minéraux déficitaires (Braud, 1987). De plus, les amendements locaux à base de dolomie et de Burkina phosphate, dont l'efficacité a été mise en évidence pour lutter contre l'acidification du sol (Bado *et al.*, 1993; Lompo *et al.*, 2009) sont rarement utilisés par les producteurs.

Ce travail a été réalisé dans un contexte où la gestion de la fertilité des sols est un défi à relever pour la durabilité de la culture cotonnière. Les principaux objectifs assignés à l'étude sont (i) d'analyser les facteurs d'acidification des trois principaux types de sol cultivés en zone cotonnière, (ii) de déterminer les effets des amendements calco-magnésiens sur l'acidification, les propriétés chimiques et biologiques du sol et (iii) d'évaluer l'influence de la gestion des résidus de récolte à long terme sur l'acidité et les autres propriétés du sol, dans un système de culture coton-céréales.

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

- i) le niveau d'acidification des sols dépend, d'une part, de la nature du sol et, d'autre part, des pratiques culturales ;
- ii) l'apport des amendements calco-magnésiens permet de réduire l'acidité des sols, d'améliorer la nutrition minérale, le rendement des cultures et les propriétés chimiques et biologiques du sol ;

iii) la gestion intégrée des résidus de récolte réduit l'acidification, améliore les propriétés chimiques du sol, et assure la durabilité des systèmes de culture coton-céréales.

La restitution des résultats de l'étude est organisée en trois parties.

La première partie comporte deux chapitres et est consacrée à une revue de littérature, qui décrit la zone cotonnière ainsi que les contraintes de production dans les systèmes de culture à base de cotonnier et de céréales. Cette partie aborde également les problèmes d'acidification des sols, ses conséquences sur les propriétés des sols et sur la durabilité des systèmes de culture.

La deuxième partie, composée d'un chapitre, traite du matériel et présente de façon détaillée la méthodologie de l'étude. Cette partie précise les sites d'étude, le matériel végétal et les fumures utilisées lors de différentes expérimentations.

Dans la troisième partie, structurée en trois chapitres, les résultats et leur discussion sont présentés. Le premier chapitre de cette troisième partie expose les résultats de la caractérisation de l'acidité des sols cultivés en zone cotonnière, tandis que le deuxième chapitre présente les effets des amendements locaux pour lutter contre l'acidification de ces sols. Enfin, le troisième chapitre analyse les effets de la gestion des résidus de récolte sur l'acidification du sol dans les systèmes de culture coton-céréales.

Une analyse critique des résultats est synthétisée dans la conclusion générale. Une liste de références bibliographiques et des annexes complètent le document.

PREMIERE PARTIE

PRESENTATION DE LA ZONE COTONNIERE ET SYNTHESE

BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ACIDIFICATION DES SOLS

CHAPITRE 1. PRESENTATION DE LA ZONE COTONNIERE DU BURKINA FASO

1.1. Principales caractéristiques de la zone cotonnière du Burkina Faso

Au Burkina Faso, le coton est cultivé en condition pluviale stricte sur divers types de sols. L'aire de production du coton est plutôt déterminée par la pluviométrie, qui constitue un facteur limitant (Somé et Dembélé, 1996 ; Barro *et al.*, 2009). Dans les systèmes de culture à base de coton et de céréales, les conditions de production des cultures occasionnent le plus souvent l'appauvrissement des terres, en particulier leur acidification (Traoré *et al.*, 2007 b).

1.1.1. Sols du Burkina Faso et de la zone cotonnière

La zone cotonnière ouest est située entre le 11^e et le 14^e parallèles, et s'étend sur une superficie de 58 000 km² (longitude 3° - 5° Ouest, latitude 11° - 12°30' Nord) représentant 21% du territoire national. La majeure partie des sols du Burkina Faso dérive de formations cristallines (roches acides ou basiques), constituant l'ossature du pays, et de formations sédimentaires (grès, schiste). Selon la classification Française des sols (CPCS, 1967) les principaux types de sol rencontrés dans la zone cotonnière sont, les sols ferrugineux tropicaux, les sols ferrallitiques, les sols hydromorphes et les sols bruns eutrophes (Boulet et Leprun, 1969; Bunasols, 1985). Selon la classification des sols de la « World Reference Base (WRB) for soil resources », les sols ferrugineux tropicaux correspondent aux lixisols (FAO, 2006). Les sols ferrugineux se caractérisent par des horizons supérieurs lessivés et des profondeurs variables (30-80 cm) de sol exploitable par les racines des végétaux, avec une présence de cuirasses ferrugineuses des horizons sous-jacents. Ces sols représentent 39,1% des sols du pays et sont prédominants dans la zone cotonnière. Au Burkina Faso, 1,9% des sols sont ferrallitiques moyennement désaturés sur matériaux sablo-argileux (ferralsols), alors que 6,2% sont des sols bruns eutrophes (cambisols), considérés comme étant les meilleures terres du pays, en raison de leur potentiel chimique élevé.

A l'instar de la plupart des pays d'Afrique sub-saharienne, les sols du Burkina sont dans l'ensemble pauvres en éléments nutritifs et en matière organique (Ouattara 2007 ; Kouyaté *et al.*, 2007) (Figure 1). Sur ces sols assez fragiles, la teneur en matière organique est inférieure à 1% pour 55 % des sols. Dans les systèmes de culture mixtes à base de coton et de céréales, Ouattara *et al.* (2006) ont montré que les taux de matière organique du sol diffèrent d'une part, selon la texture des sols et, d'autre part, selon leur intensité culturale. En ce qui concerne le phosphore, 93% des sols présentent une teneur en P₂O₅ inférieure à 0,06%. Le phosphore assimilable est inférieur à 30 mg kg⁻¹ de terre. Les teneurs en potassium disponible sont faibles et varient en fonction du passé cultural pour les sols ferrugineux tropicaux (lixisols),

et les sols ferrallitiques (ferralsols), selon la situation topographique pour les sols hydromorphes (gleysols eutriques) et les vertisols (vertisols pelliques). La pauvreté chimique de ces sols est marquée par des pH généralement faibles. Dans la zone cotonnière ouest, environ 10% des sols sont relativement très acides, présentant des pH inférieurs à 5, avec une présence marquée d'aluminium échangeable (Dakouo, 1994 ; Bondé, 2007). Par ailleurs, les sols de la zone cotonnière ouest se caractérisent par une structure massive, peu cohérente et une stabilité moyenne à mauvaise, d'où une sensibilité à l'érosion (Boulet, 1976, Zombré, 2003). La plupart de ces sols sont affectés par le problème d'acidité, qui limite les productions et ne permet pas une bonne valorisation des engrais minéraux appliqués sur les cultures (Figure 1).

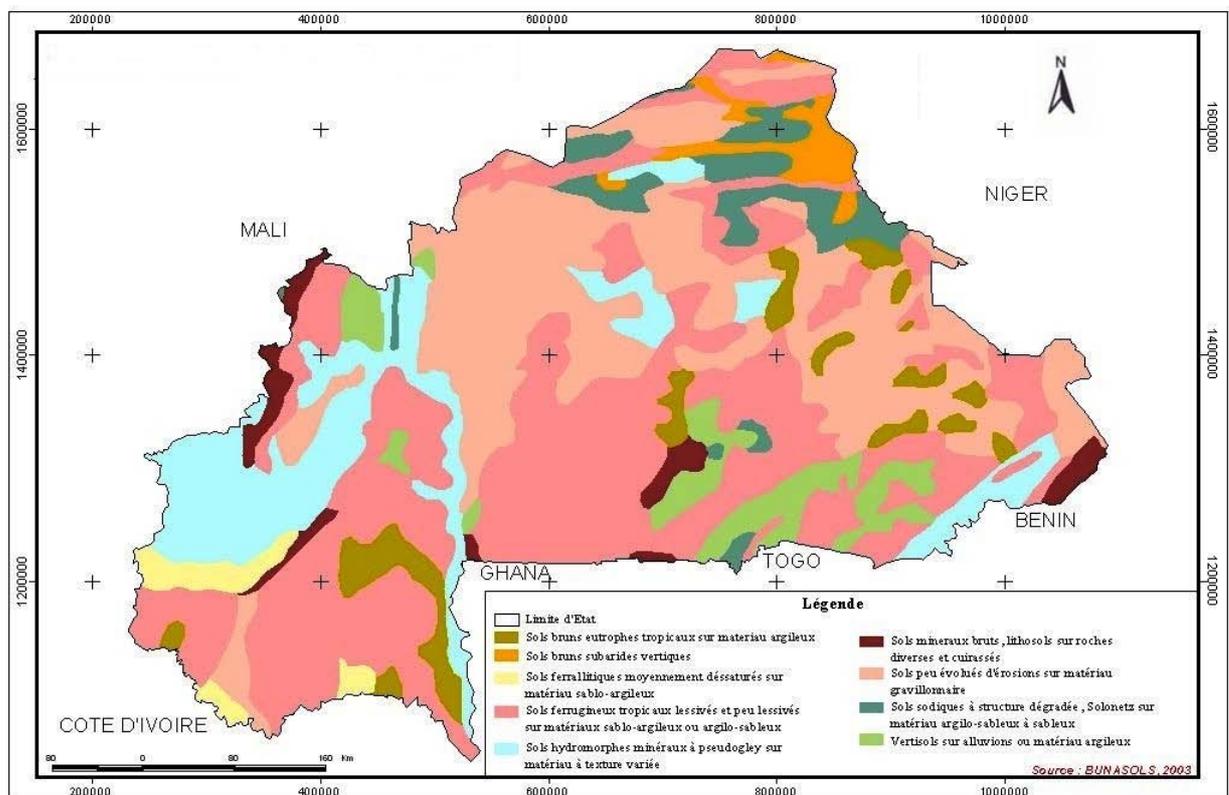


Figure 1. Carte des sols du Burkina Faso.

1.1.2. Climat

La zone cotonnière, de par sa situation géographique, s'étale sur deux zones climatiques, qui sont la zone soudanienne (isohyètes 900-1100 mm) et la zone soudano-sahélienne (isohyètes 600-900 mm). Sur la base des précipitations, la zone cotonnière se caractérise par l'alternance de deux saisons bien marquées ; la saison sèche plus longue, dure 7 à 8 mois (novembre à mai), tandis que la saison pluvieuse, qui prévaut de mi-mai à mi-octobre, ne dure qu'environ 5 mois (Figure 2).

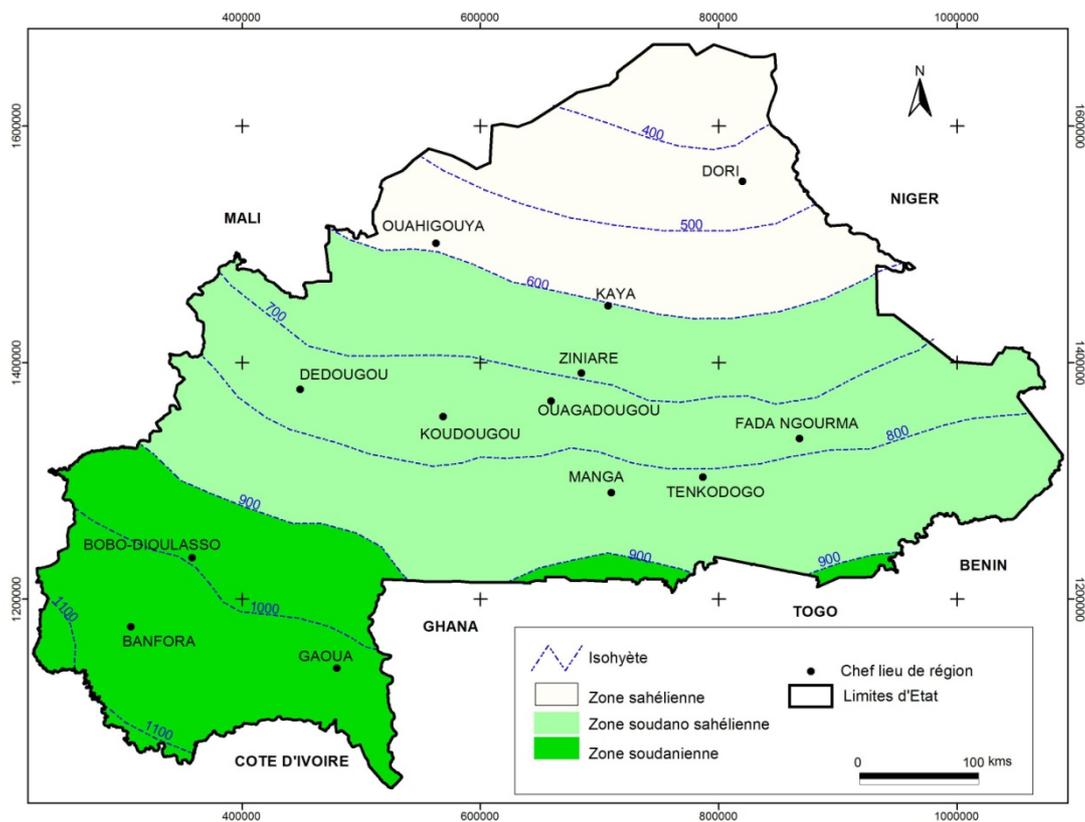


Figure 2. Zones climatiques du Burkina Faso.

1.1.2.1. Pluviométrie

A l'instar du reste du pays, la zone cotonnière est marquée par une variation spatio-temporelle des conditions climatiques dans le sens nord-sud, sens dans lequel croît progressivement la pluviométrie (Sivakumar et Gnoumou, 1987). Cette pluviométrie est très souvent irrégulière et, sa variabilité, qui est inter-annuelle et saisonnière, joue sur la production des cultures. Le climat de toute la région est marqué par de larges variations des précipitations d'une année sur l'autre (Barro *et al.*, 2009). On observe une tendance climatique vers la sécheresse ; ce qui se traduit par une descente latitudinale des isohyètes à un rythme de deux degrés tous les dix ans, et une diminution des précipitations journalières supérieures à 40 mm.

Les zones cotonnières se sont ainsi déplacées de la partie située au nord des régions centrales vers le sud et le sud-ouest du pays, en raison de la dégradation des conditions environnementales, principalement liée à la pluviométrie, qui a reculé vers le sud au cours des récentes décennies (CSAO, 2005). Mais, elle peut également être le fait de pressions démographiques de plus en plus fortes, du développement de l'élevage (CSAO, 2005). Toutefois, on peut dire que les quantités d'eau tombées annuellement sont suffisantes pour assurer une bonne production cotonnière et céréalière. En revanche, la mauvaise répartition des

pluies en début et en fin de saison pluvieuse, compromet fréquemment les productions agricoles (Kambiré, 2000).

1.1.2.2. Températures

Au Burkina Faso, les variations saisonnières des températures sont importantes, avec des moyennes mensuelles qui dépassent rarement 35°C. Les amplitudes thermiques diurnes journalières et annuelles deviennent de plus en plus importantes au fur et à mesure que l'on progresse vers le Nord du pays. Les mois les plus chauds de l'année, sont mars et avril (36 à 41°C), tandis que les mois les plus frais, sont ceux de décembre et de janvier (32 à 36°C).

1.1.3. Végétation naturelle

Le paysage végétal dominant est une savane arborée ou boisée, coupée de galeries denses (Terrible, 1982 ; Guinko, 1984). Les espèces arborées les plus fréquentes sont, *Parkia biglobosa* (Fabaceae), *Vitellaria paradoxa* (Sapotaceae), *Khaya senegalensis* (Meliaceae), *Pterocarpus erinaceus* (Fabaceae), *Isoberlinia doka* (Fabaceae), *Daniellia oliveri* (Caesalpiniaceae), *Anogeissus leiocarpus* (Combretaceae). Quant à la composante arbustive, elle regroupe selon, Guinko (1984), les espèces telles que *Balanites aegyptiaca* (Zygophyllaceae), *Commiphora africana* (Burseraceae), *Ceiba pentandra* (Bombacaceae) ; enfin la strate herbacée est dominée par des graminées, à savoir : *Andropogon pseudapricus*, *A. amplectus* ou *A. gayanus*, *Pennisetum pedicellatum*, *Dactyloctenium aegyptium*, *Eragrostis tremula*, ou *E. ciliaris*, *Schoenefeldia gracilis* et *Loudetia simplex* ou *L. togoensis*.

Le paysage végétal évolue sous le contrôle des facteurs humains et climatiques. Ainsi, la croissance des surfaces cultivées, sous l'impulsion de la démographie croissante (migrations internes) et du développement de la culture cotonnière, se fait au détriment des brousses. Terrible (1982) observe par exemple qu'entre 1952 et 1975, les galeries ont perdu environ la moitié de leur longueur et que seulement 1/3 des formations végétales, en 1975, correspond à celles de 1952. La pression humaine, couplée à la dégradation climatique, a eu, entre autres, pour conséquences, la disparition d'espèces végétales plus exigeantes et l'apparition d'autres espèces plus résistantes à certaines latitudes. Traoré *et al.* (2007 a) ont montré un changement dans l'utilisation des terres dans le terroir de Balla, situé en zone cotonnière, où les superficies cultivées sont passées de 10% en 1952 à 48% en 1999. En plus de l'accroissement des superficies cultivées, ces auteurs soulignent un effet dépressif de la mise en culture des terres sur la végétation, qui s'est traduite par une baisse de la richesse et de la densité floristique, en corrélation avec les niveaux de mécanisation des exploitations.

1.1.4. Relief et hydrographie

Dans son ensemble, le paysage du Burkina Faso se caractérise par un relief plat, où l'altitude moyenne ne dépasse pas 400 m, et près de la moitié du pays se trouve entre 250 m et 350 m. Le paysage est dominé par des chaînes de collines et des reliefs résiduels en relation avec le substratum géologique. On distingue une pénéplaine cristalline, qui couvre les trois quarts du pays et des plateaux gréseux qui occupent les parties ouest, nord-ouest et est du pays. Le plateau ouest, assez accidenté, abrite le point culminant du pays, le mont Ténakourou (749 m).

Le bassin hydrographique du pays se rattache à trois bassins principaux. Il s'agit des bassins de la Volta (Mouhoun, Nakambé et Nazinon), de la Comoé et du Niger. Malgré la monotonie du relief, le réseau hydrographique est relativement dense. La zone cotonnière est parcourue par quelques cours d'eau (la Comoé, le Mouhoun et la Léraba) qui parviennent, de nos jours, à maintenir un régime permanent.

1.1.5. Contexte géologique

Le Burkina Faso est un pays relativement plat, constitué de trois grands ensembles géologiques, qui sont, le bouclier africain, les bassins sédimentaires et les dépôts quaternaires (Zombré, 2003 ; Ouattara, 2009).

Le bouclier africain est composé du vieux socle cristallin granito-migmatitique, qui constitue l'ossature de la majeure partie du pays (80%), et des formations de nature sédimentaire (schiste, grès du Sud-Ouest) ou volcanique (ceinture de roches vertes du centre et du Nord-ouest).

Les bassins sédimentaires sont composés de schistes et de grès longeant la limite occidentale et l'extrême Sud-Est du pays.

Les dépôts quaternaires sont constitués des formations éoliennes (ergs fixés ou non) dans le sahel, et les formations alluviales dans les plaines lacustres du Sourou ainsi que les plaines fluviales du réseau hydrographique ancien ou actuel.

1.2. Systèmes de culture coton-céréales et fertilité des sols

En raison de ses potentialités pédoclimatiques, l'ouest du pays, marqué par un courant migratoire important, est la zone de prédilection des systèmes de culture à base de coton et de céréales. La pression démographique dans la zone cotonnière ouest s'accompagne d'une dégradation du milieu naturel (Ouattara, 2009). Cette zone, du fait de la présence d'une culture de rente, en l'occurrence le coton, cultivé sur 30 à 40% des superficies, se caractérise par la présence de systèmes de cultures relativement intensifs et en voie de sédentarisation, un niveau

d'équipement agricole appréciable, une dégradation perceptible des ressources naturelles (Ouattara *et al.*, 2006).

1.1.1. Typologie des exploitations

La typologie des exploitations dans la zone cotonnière ouest révèle que 33% des exploitations dites manuelles ne sont pas équipées, tandis que 66,3% sont équipées en matériels de culture attelée (CSAO, 2005). Les exploitations motorisées, équipées de tracteur, sont inférieures à 1% (Millogo, 2002). Le niveau de mécanisation influence les superficies cultivées, qui sont en moyenne de 3,39 hectares pour les systèmes de culture manuelle, contre 12 à 20 hectares pour les exploitations en culture attelée et 27,24 hectares pour les motorisés (Kambiré, 2000). Lendres (1990) a mis en évidence, dans une étude portant sur les stratégies d'utilisation des intrants, que les dérives techniques dans la fertilisation en culture cotonnière sont en relation avec les niveaux d'équipement des exploitations.

1.1.2. Systèmes de culture

Dans les zones cotonnières, les cultures sont essentiellement céréalières avec le sorgho, le mil, le maïs, le riz, et, accessoirement, le sésame et le fonio, qui sont souvent associés à des légumineuses comme l'arachide et le niébé (Millogo, 2002). Les assolements et rotations pratiqués dans ces systèmes de culture autrefois basés sur des rotations triennales coton-maïs-sorgho, ont désormais évolué vers une rotation biennale coton-maïs, plus rémunératrice (Dakouo, 1991). Le coton représente en moyenne 65% des revenus des ménages agricoles, et, à ce titre, sa culture constitue un important levier dans la lutte contre la pauvreté au Burkina Faso (AICB, 2008). Depuis la libéralisation de la filière coton, intervenue en 2004, la production de coton est assurée par trois sociétés cotonnières que sont la SOFITEX, FASO COTON et SOCOMA, situées, respectivement, à l'Ouest, au Centre et à l'Est du pays (Figure 3). Les pratiques extensives de gestion de la fertilité sont développées et s'accroissent avec les contraintes socio-économiques ou techniques. Les cultures vivrières sont produites de façon extensive, ce qui entraîne des rendements faibles, tant pour le sorgho (0,8 à 1 t ha⁻¹) que le mil (0,4 à 0,7 t ha⁻¹) (Coulibaly *et al.*, 2000). Par contre, le coton et le maïs sont cultivés de façon relativement intensive, avec des apports d'engrais organiques et minéraux. L'engrais minéral, apporté systématiquement, présente, sur la culture céréalière qui succède au coton, un arrière-effet positif, en particulier sur le maïs, qui offre la meilleure réponse (Traoré *et al.*, 2007 a). Dans tous les cas, la gestion de la fertilité pratiquée dans les systèmes de cultures, ne permet pas, le plus souvent, de couvrir les exportations des cultures (Roose et Barthès, 2001). La mauvaise gestion des terres agricoles et l'inadéquation entre le prix des intrants et celui des

cultures vivrières constituent des éléments importants dans la dégradation continue des sols, entraînant un appauvrissement rapide des sols en éléments nutritifs et une baisse de la productivité des cultures (Sanchez *et al.*, 1997 ; Bationo *et al.*, 2004). En dépit de l'importance de la fertilité des sols dans la productivité des cultures, les problèmes de dégradation des sols sont multifformes et conduisent le plus souvent à leur acidification (Agoumé et Birang, 2009).

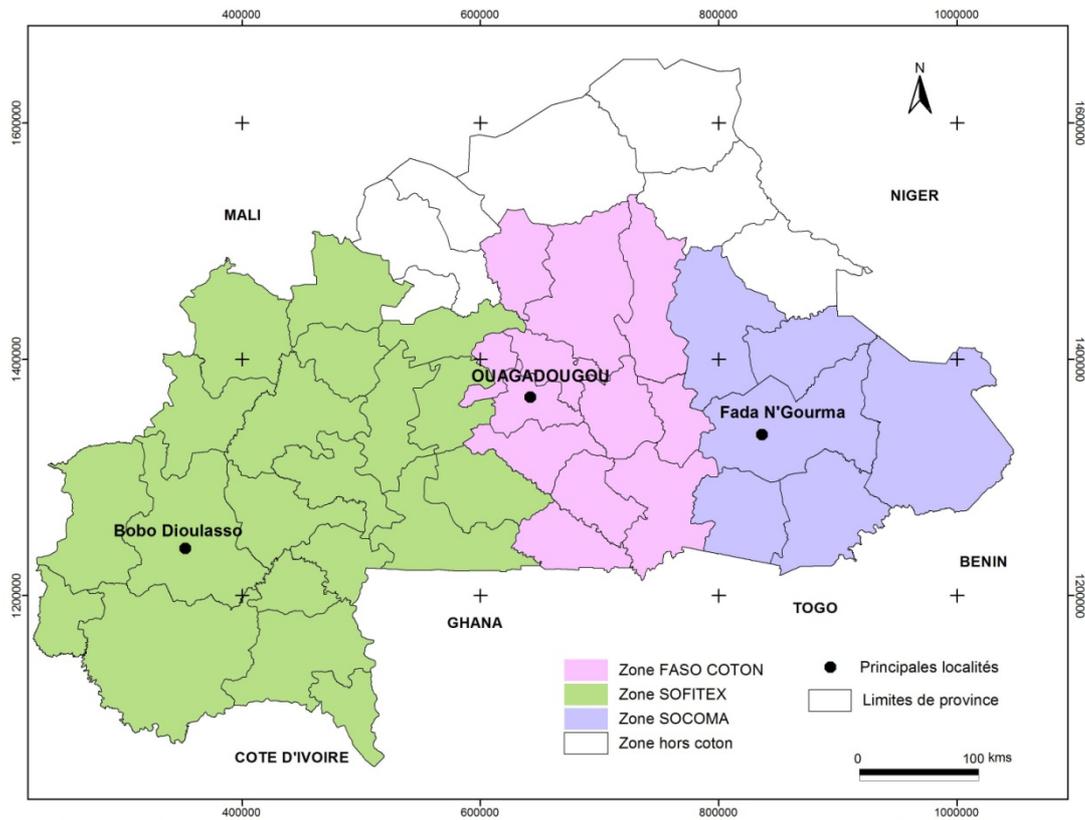


Figure 3. Les zones cotonnières du Burkina Faso.

1.2. Effets de la fertilisation du cotonnier sur la fertilité des sols en zone cotonnière

1.2.1. Evolution des formules de fertilisation en culture cotonnière

La fertilisation pratiquée dans les systèmes de culture à base de cotonnier et de céréales est déterminante pour assurer une gestion rationnelle de la fertilité des sols. Depuis les années 1972, les travaux réalisés par l'Institut de Recherche du Coton et des Textiles exotiques (IRCT), puis, par l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) ont permis de dégager les grands axes de la fertilisation du cotonnier que résument Berger *et al.* (1987), Dakouo (1991) et Hien *et al.* (1994). Les essais soustractifs conduits à travers le pays ont permis de définir les besoins en éléments nutritifs du cotonnier, et donc, de déterminer les formules de fertilisation adéquates (Braud, 1987; Hien, 1990 ; Dakouo, 1994). Les formules d'engrais jugées

efficaces du point de vue agronomique, favorables et rentables économiquement, à un moment donné, ont été constamment améliorées en rapport avec les progrès techniques et l'économie de marché. Jusqu'en 1973, la fertilisation minérale du cotonnier était constituée de 100 kg ha⁻¹ d'un mélange composé de 70 kg de phosphate d'ammonium et de 30 kg de sulfate d'ammonium. Le sulfate de potassium a été ainsi éliminé de la formule d'engrais, car beaucoup plus acidifiant que le chlorure de potassium. De 1973 à 1979 on a utilisé 150 kg ha⁻¹ d'un mélange NPK (14-23-14) enrichi en boracine et en soufre. A partir de 1979, cette formule est complétée par un apport de 50 kg ha⁻¹ d'urée à 40 jours après les semis, le 14-23-14 étant appliqué au semis. Depuis cette date, plusieurs formules d'engrais coton (NPKSB), plus ou moins équivalentes, ont été vulgarisées : 14-23-14-6S-1B, 13-20-15-6S-1B, 15-15-15-6S-1B, 15-20-15-6S-1B et 14-18-18-6S-1S (Koulibaly, 2000). L'évolution des différentes formules de fertilisation dans les systèmes de culture à base de cotonnier met en évidence le souci de mieux adapter la fertilisation aux conditions du milieu. L'azote ammoniacal est facilement toxique pour les racines et encourt des pertes par volatilisation dans le sol, d'où la nécessité de fractionner les apports d'azote entre le semis et le 40^e jour (Berger *et al.*, 1987). La fumure vulgarisée, destinée à la fertilisation minérale du cotonnier, préconisait, en plus de 150 kg ha⁻¹ d'engrais coton (NPKSB) à la levée, un complément de 50 kg ha⁻¹ d'urée appliqué à 40 jours. A partir de 1998, la formule d'apport unique 22-14-13-4,5-0,75 ou 22-13-12-4,5S-3,5MgO-0,75B, appliquée à la dose 200 kg ha⁻¹ au premier sarclage, a été vulgarisée, constituant ainsi le second mode de fertilisation minérale du cotonnier (Koulibaly *et al.*, 2002). Cette «formule unique», qui est apportée en une seule application, entre 20 et 30 jours après semis, a permis de donner une nouvelle orientation à la fertilisation minérale du cotonnier au Burkina Faso. Avec une efficacité supérieure ou égale à celle des apports fractionnés, la formule unique présente l'avantage de cumuler les opérations de sarclage et d'épandage des engrais dont l'enfouissement permet d'accroître l'efficacité. Outre une économie de 5 hommes/jour/ha sur les temps de travaux, Koulibaly *et al.* (2002) rapportent que l'apport unique est particulièrement adapté aux conditions de culture plus sèches, et permet de minimiser les effets pervers des semis tardifs, qui représentent un taux non négligeable en milieu paysan.

La culture cotonnière au Burkina Faso est caractérisée par une augmentation spectaculaire des superficies cultivées, qui sont passées de 180 000 ha en 1996 à 715 855 ha en 2006. La production cotonnière est passée de 214 000 tonnes en 1996 à un record de 715 000 tonnes de coton graine en 2006, faisant du Burkina Faso, le premier producteur de coton en Afrique. Depuis cette date jusqu'à nos jours, la production cotonnière varie entre 300 000 et 400 000 tonnes de coton graine par an. L'augmentation des superficies cultivées en

coton a entraîné un accroissement de la consommation annuelle des engrais minéraux, constitués de « l'engrais coton » NPKSB et de l'urée (Figure 4). De 2000 à 2006, les quantités d'engrais minéraux utilisés dans les zones de production de coton sont ainsi passées de 43 600 à 136 690 tonnes par an. Les engrais destinés au coton sont également utilisés pour fertiliser les cultures vivrières, notamment le maïs, ce qui justifie le plus souvent, la dilution des engrais (Olina Bassala *et al.*, 2008). Afin de minimiser les risques, et surtout de réduire les coûts des intrants, les producteurs réalisent en général une économie sur les facteurs de production, à l'exception de la semence. Les dérives sur la fertilisation dénotent un problème de non respect des doses, mais aussi de la faible valorisation de l'engrais, à cause de son apport presque toujours tardif et sans enfouissement (Traoré *et al.*, 2007 a).

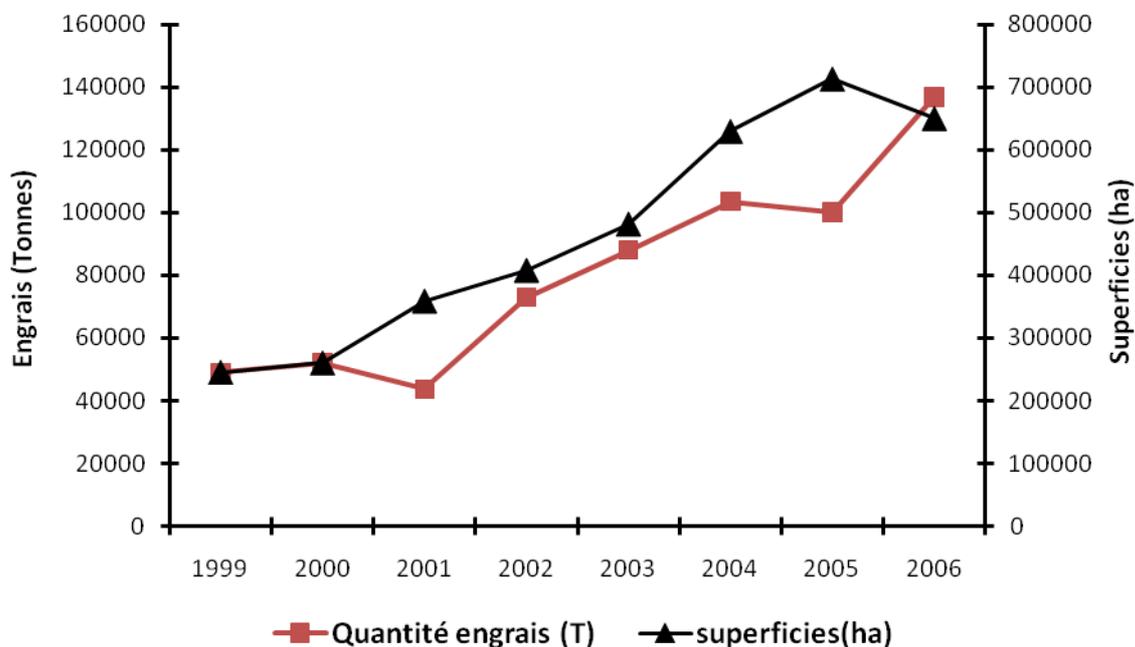


Figure 4. Quantités d'engrais minéraux utilisés et superficies en coton de 1999 à 2006 au Burkina Faso.

1.2.2. Effet de la fertilisation minérale dans les systèmes de culture

La fertilisation doit à la fois corriger les carences du sol et restituer les éléments exportés par le végétal, ou perdus par lixiviation, tout au moins ceux qui se trouvent dans le sol à un niveau proche de la déficience (Braud, 1987). Les effets de l'utilisation des engrais sur l'environnement peuvent être positifs et négatifs selon Olina Bassala *et al.* (2008), ce qui traduit la complexité de la fertilisation. En augmentant les rendements des meilleures terres, les engrais peuvent aider à empêcher d'exploiter des terres marginales sensibles à l'érosion ou à d'autres contraintes de production. Par contre, en apportant peu ou pas du tout de

nutriments, l'enlèvement des produits récoltés sans remplacement des nutriments exportés par les récoltes entraîne un déclin continu de la fertilité du sol (Mills et Fey, 2003).

Selon Braud (1987), les exportations de la culture, les pertes par lixiviation et échanges gazeux doivent être compensées par une fumure de redressement et par une fumure d'entretien, qui compensent les mobilisations non restituées de la culture. Dans la plupart des cas, les bilans minéraux sont déficitaires, en particulier pour l'azote, le potassium, le calcium et le magnésium. Pour ces deux derniers éléments, le bilan est toujours déficitaire, et même largement déficitaire lorsque les résidus de culture ne sont pas restitués. Dans une étude sur la fertilisation organo-minérale en culture continue d'une rotation maïs-coton, Bationo *et al.* (2004) ont mis en évidence le rôle et la complexité de la fertilisation en milieu tropical. Après 10 années de culture, l'étude a montré la possibilité d'envisager une agriculture intensive à condition de suivre de près l'évolution de la fertilité des sols, et d'ajuster la fertilisation aux besoins réels des plantes. L'auteur indique la nécessité d'une utilisation rationnelle des engrais minéraux, qui constituent l'un des principaux facteurs de production agricole.

Cependant, si les engrais minéraux permettent d'atteindre des niveaux élevés de production, ils ne suffisent pas pour maintenir la fertilité des terres, car ils n'ont aucun effet sur le statut organique du sol (Roose et Barthès, 2001 ; Namam *et al.*, 2001). Hien *et al.* (1994), précisent le rôle limité de la seule fumure minérale dans l'intensification des cultures de la zone cotonnière. L'analyse des propriétés physico-chimiques du sol a montré également une évolution négative des principales caractéristiques en fonction de la durée de mise en culture des terres. Piéri (1989) a expliqué ce phénomène de baisse de la fertilité par les exportations minérales, la non restitution organique et l'utilisation d'engrais acidifiants. Ainsi, après plusieurs années de culture, avec l'utilisation ou non de la fumure minérale, le pH du sol baisse et le taux de matière organique chute (Bacyé *et al.*, 1998). Des amendements sont alors nécessaires partout où l'on a détruit l'équilibre naturel par la mise en culture des terres, qui limite considérablement les remontées d'éléments solubles entraînés en profondeur.

En considérant les éléments évoqués plus haut, il apparaît que dans les zones cotonnières, la pratique de la gestion de la fertilité des sols ne permet généralement pas de couvrir les exportations des cultures. Cette mauvaise gestion des terres agricoles, consécutive à l'insuffisance, voire l'absence des apports d'engrais sur les cultures vivrières, est déterminante dans le processus de dégradation continue des sols, ce qui entraîne leur appauvrissement rapide en éléments nutritifs ainsi que la baisse des rendements des cultures. L'acidification des sols dans ce contexte devient une question centrale, qui nécessite d'être convenablement gérée après avoir analysé les principaux facteurs impliqués.

CHAPITRE 2. REVUE DE LITTÉRATURE SUR L'ACIDIFICATION DES SOLS

2.1. Acidification des sols et conséquences sur les systèmes de culture à base de coton

2.1.1. Principales causes de l'acidification des sols

Les causes de l'acidification des sols ont été analysées et mises en évidence par divers travaux réalisés à travers le monde (Kopittke et Menzies, 2005). L'acidification des sols s'exprime par la baisse de leur pH et est la conséquence de l'abaissement progressif de leur capacité à neutraliser les acides (Whalen *et al.*, 2000). L'acidification un phénomène naturel né de la pédogenèse dans les climats tropicaux les plus humides, mais aussi, un phénomène provoqué par la mise en culture et la dégradation progressive (Dabin, 1985). Selon cet auteur, les différentes causes physico-chimiques de l'acidité du sol sont en relation avec l'action des facteurs du milieu et des facteurs internes du sol tels que la nature du complexe adsorbant, la minéralogie des argiles et le rôle de la matière organique. Le déficit de saturation en bases des sols peut être dû à la nature de la roche-mère, étant donné que les roches basiques fournissent des sols mieux pourvus en cations alcalino-terreux que certaines roches quartzieuses acides. La kaolinite, qui est l'argile dominante dans beaucoup de sols des régions inter-tropicales, possède une capacité d'échange faible, de 5 à 10 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ d'argile (Boyer, 1978; Dabin, 1985). Le lessivage du sol, les pertes de réserves minérales et celles du pouvoir de rétention au cours de la pédogenèse, les pertes des cations basiques par lixiviation et par érosion après défrichement, constituent les principales causes de l'acidification des sols (Agoumé et Birang, 2009). Le problème de l'acidification est élargi à l'ensemble des phénomènes de dégradation du sol : perte de structure, de matière organique, libération d'éléments toxiques, tant sur le plan local qu'à l'échelle du paysage, en fonction des transferts verticaux ou latéraux et des types d'évolution de la matière organique des sols. L'acidification met en jeu différents processus et phénomènes d'ordre physico-chimique, comme la désaturation en cations alcalins et alcalino-terreux et l'aluminisation (Pernes-Debuyser et Tessier, 2002).

Les sols acides ou à risque élevé d'acidification recouvrent des surfaces très importantes dans les zones intertropicales d'Afrique, d'Asie, d'Amérique Latine, et correspondent à des régions de peuplement ou de mise en valeur (Deckers, 1993). D'après Mills et Fey (2003), 29% du continent africain, soit 8,8 millions de km^2 sont constitués de terres acides. En Afrique subsaharienne, les sols ferrugineux (lixisols), qui représentent 33% des terres, sont faiblement acides, avec des pH compris entre 6 et 6,5 (Deckers, 1993). La perte progressive des cations basiques du complexe adsorbant s'accompagne d'une baisse du pH et d'un accroissement progressif de l'aluminium échangeable. La plupart des sols en zone

cotonnière sont affectés par l'acidification qui serait favorisée par divers facteurs dont les pratiques culturales.

2.1.2. Dégradation de la fertilité et acidification par la mise en culture des sols

En zone tropicale sèche, la mise en culture des terres entraîne une diminution rapide du stock de matière organique et l'apparition de carences en azote, en phosphore et en éléments minéraux divers (Wolkoff *et al.*, 1999). Pour montrer l'importance des pratiques agricoles, Smalling (1993) définissait l'agriculture durable comme «impliquant la gestion efficace des ressources en vue de satisfaire les besoins changeants de l'humanité, tout en maintenant ou améliorant la qualité de l'environnement, et en conservant les ressources naturelles». A partir d'une expérimentation de longue durée, Pernes-Debuyser et Tessier (2002) rapportent que les pratiques de fertilisation et d'amendement contribuent à modifier les propriétés des sols. Ces pratiques ont, non seulement, affecté la capacité d'échange en cations du sol et modifié la garniture cationique des constituants, mais aussi, ont influencé la mobilité des éléments dans le sol. Ces auteurs ont montré, après 70 années d'expérimentation, que les parcelles recevant les engrais ammoniacaux sont très acides. En outre, la nature et la teneur en cations échangeables ont varié, puisque dans les parcelles recevant les engrais ammoniacaux, le calcium échangeable représente moins de 5% de la CEC, alors qu'il se situe à plus de 90% de la CEC dans les parcelles basiques.

La dégradation de la fertilité des sols cultivés constitue une contrainte majeure pour la plupart des exploitations agricoles du Burkina Faso (Zougmore *et al.*, 2004 ; Sawadogo *et al.*, 2008). Cette dégradation du sol peut être provoquée, soit par la forte perte physique de la fertilité, soit par l'érosion éolienne ou hydrique, ou par l'appauvrissement des ressources de nutriments, en absence d'apport d'engrais suffisants (Ouattara, 2007). Dans l'ouest du Burkina Faso, la plupart des terres sont exploitées suivant des systèmes de culture à base de cotonnier et de céréales (Ouattara *et al.*, 2006). Dans cette zone, la dégradation de la fertilité des sols liée aux pratiques culturales, se traduit par une baisse des rendements des principales cultures, en dépit d'apports importants d'engrais minéraux. Dans un tel contexte, il paraît difficile d'assurer un maintien durable de la fertilité des sols. Aussi, les études antérieures indiquent-elles que l'utilisation exclusive de fumures minérales, même à fortes doses, ne permet pas d'améliorer les rendements lorsque les teneurs en matière organique se situent au seuil de 0,6% (Berger *et al.*, 1987 ; Hien *et al.*, 1994). La culture continue, sans aucune restitution organique et/ou minérale, entraîne la baisse de la fertilité des sols (Somé *et al.*, 2004). En comparant des parcelles cultivées d'âges différents à une parcelle sous végétation

naturelle, Roussel *et al.* (2001) constatent une baisse très marquée de la teneur en matière organique et de la capacité d'échange cationique avec la durée de la mise en culture. Mills et Fey (2003), indiquent que sans une restitution organique pour compenser les pertes par minéralisation, le taux de matière organique du sol baisse rapidement et entraîne une diminution des teneurs des bases échangeables, de la capacité d'échange cationique, une acidification et une augmentation de la teneur en aluminium échangeable. La pression démographique en zone cotonnière ouest au Burkina Faso a entraîné une forte réduction de la durée de la jachère, voire l'abandon de cette pratique (Yoni *et al.*, 2005 ; Somé *et al.*, 2007). Les sols sont exploités sans une fertilisation minérale ou organique adéquate, ce qui favorise une baisse rapide de leur fertilité aux conséquences multiples (Roose et Barthès, 2001). Dakouo (1991), précisait que 10% des sols de la zone cotonnière ouest du Burkina Faso avaient un pH inférieur à 5 alors que 60% avaient des pH compris entre 5 et 6. Dabin (1985) souligne d'importantes dégradations des sols sous culture, avec une baisse de la somme des bases échangeables et du pH, ainsi que des pertes importantes de calcium et de magnésium. Dans une étude portant sur l'entretien de la fertilité réalisée sur un sol ferrugineux tropical (lixisol), Sédogo (1993) montre qu'au bout de 30 ans de mise en culture des terres, le taux de carbone se stabilise à 0,23%, tandis que la capacité d'échange cationique évolue dans le même sens que la matière organique, avec une baisse du pH. L'acidification du sol s'accompagne aussi d'une augmentation progressive du taux d'aluminium échangeable (Sédogo, 1993).

La fertilisation joue un rôle très important et vise à satisfaire convenablement les besoins de la plante en éléments minéraux. En plus du lessivage et de la lixiviation générés par les eaux des pluies, l'acidification des sols est également due aux exportations des cations par les récoltes (Boyer, 1978 ; Fabre et Kockman, 2002). Dans les systèmes de culture à base de cotonnier, les bilans minéraux sont le plus souvent déficitaires pour l'azote, le potassium, le calcium et le magnésium. Pour ces deux derniers éléments, le bilan est toujours très largement déficitaire lorsque les résidus de culture ne sont pas restitués (Braud, 1987). Seul le phosphore présente un bilan positif, ce qui corrige progressivement la carence des sols, laquelle est en général assez forte (Deckers, 1993).

2.1.3. Effets de la fertilisation minérale sur l'acidification des sols cultivés

L'épuisement et la dégradation des sols sont de sérieux problèmes qui aggravent la pauvreté en Afrique subsaharienne, car ils entraînent une baisse des rendements des cultures (Kouyaté *et al.*, 2007). Une fertilisation déséquilibrée accélère la dégradation du sol, donnant

ainsi un fondement à l'assertion selon laquelle, les engrais «tuent» le sol. La fertilisation dans les systèmes de culture à base de cotonniers et de céréales est déterminante sur la durabilité des exploitations agricoles. En Afrique subsaharienne, la majorité des sols se caractérisent par une grande fragilité et présentent une fertilité chimique médiocre (Pieri, 1989). La faible fertilité de ces sols serait la principale contrainte qui limite la production agricole et qui justifie l'efficacité des engrais minéraux au début de leur exploitation (Bado *et al.*, 1997). Ces sols s'acidifient de plus en plus à cause de l'utilisation d'engrais acidifiants. Partant d'une expérimentation de longue durée, Pernes-Debuyser et Tessier (2002) rapportent que les engrais ammoniacaux conduisent à des parcelles très acides, à faible capacité d'échange cationique, qui est essentiellement saturée par l'aluminium échangeable. L'effet acidifiant des engrais est remarquable étant donné que le sol d'une culture fertilisée perd plus de cations que celui cultivé sans engrais (Mills et Fey, 2003). La fertilisation minérale seule induit une acidification du sol, une décroissance des cations basiques et la solubilisation de l'aluminium (Bado *et al.*, 1997). Dans la fertilisation d'une succession culturale, Olina Bassala *et al.* (2008) ont noté une décroissance presque linéaire du calcium, du magnésium et du pH, suivant des doses croissantes d'engrais minéraux. Les apports de fertilisants acidifiants, notamment des engrais ammoniacaux, ont, non seulement affecté la capacité d'échange cationique du sol et modifié la garniture cationique en surface des constituants, mais aussi influencé la mobilité des éléments dans le sol (Pernes-Debuyser et Tessier, 2002). Bado (2002) a observé sur un sol ferrugineux tropical lessivé (lixisol), que la fumure minérale NPK seule, appliquée pendant 8 années de culture continue, acidifiait beaucoup plus le sol et entraînait une baisse du pH KCl de 0,5 unité. Cet auteur a constaté également que l'acidité d'échange des parcelles fertilisées avec l'engrais minéral était plus élevée, avec une augmentation de la teneur en aluminium de 6% par rapport au sol initial.

En culture cotonnière au Burkina Faso, la fertilisation repose principalement sur l'engrais coton et l'urée, qui sont acidifiants. L'acidification du sol est favorisée par le sulfate d'ammoniaque, le nitrate d'ammoniaque et l'urée. Boyer (1978) a observé une baisse du pH de 6,4 à 4,8, seulement 48 heures après l'apport de sulfate d'ammoniaque sans enfouissement, ce qui dénote d'un entraînement des bases du complexe adsorbant, par drainage. L'hydrolyse de l'urée, en présence de l'uréase, conduit à la libération d'ions H^+ qui acidifient le milieu (Rabeharisoa, 2004). Les nitrates et l'urée ont une action beaucoup moins acidifiante que le sulfate d'ammoniaque (Abessolo, 2001). Outre les éléments nutritifs qu'il apporte, l'engrais minéral modifie certaines propriétés physico-chimiques du sol (Bado *et al.* 1997). Une forte

acidité peut réduire la disponibilité en éléments nutritifs et induire des toxicités aluminiques ou manganiques, provoquant une baisse des rendements.

2.1.4. Acidification des sols par le déficit de restitutions organiques

Les restitutions organiques dans les systèmes de culture à base de coton et de céréales, jouent un rôle important dans l'évolution de la fertilité des sols (Bacyé *et al.*, 1998 ; Wolkoff *et al.*, 1999). Dans la zone cotonnière Ouest du Burkina Faso, ces restitutions organiques sont mal assurées car, en culture attelée, 76% des exploitations pratiquent l'épandage de terre de parc à des doses inférieures à 1 t ha⁻¹, ce qui est incompatible avec le maintien de la fertilité (Millogo, 2002). La mise en culture des sols se traduit par une perte annuelle de 2 à 4% de matière organique qui chute très rapidement pour atteindre, après douze ans de culture continue, 0,6%, représentant le seuil de non réponse aux engrais minéraux (Berger *et al.*, 1987 ; Hien *et al.*, 1994). Les études sur le maintien de la fertilité dans les systèmes de culture conduites en motorisation intermédiaire dans l'Ouest du Burkina Faso indiquent, après 3 à 9 ans, une diminution progressive de la somme des bases échangeables et de la capacité d'échange cationique, accompagnée d'une baisse du pH, une diminution des teneurs de matière organique, d'azote total, de phosphore total et de potassium, ainsi qu'une baisse de production (Dakouo, 1991).

La dégradation de la fertilité constitue un facteur limitant de la production agricole susceptible de compromettre la durabilité des systèmes de culture (Roussel *et al.*, 2001). L'une des raisons expliquant cette situation est que, dans la plupart des systèmes de production, les restitutions organiques faibles, se limitent essentiellement à la biomasse racinaire (Manlay *et al.*, 2007). Les résidus de récoltes sont en général destinés à d'autres utilisations. Les exportations de calcium et de magnésium par les récoltes varient suivant les espèces cultivées et le rendement. Au fur et à mesure des prélèvements d'éléments nutritifs par les plantes, le sol tend à s'acidifier (Vagën *et al.*, 2005). La plupart des exploitations se caractérisent par des bilans minéraux déficitaires, à cause des faibles restitutions organiques et de l'absence d'amendements calco-magnésiens (Traoré, 1995). L'acidité des sols est imputable au lessivage naturel des terres, à l'insuffisance des restitutions organiques, à la mise en culture des sols, à l'absence d'amendements calco-magnésiens et à l'application de certains engrais azotés, ce qui influence la physiologie et le rendement des cultures.

2.1.5. Influence de l'acidité sur les propriétés du sol

L'acidité influence les caractéristiques bio-physico-chimiques du sol, la composition de la solution du sol et, par conséquent, la nutrition minérale des plantes (Kaitibie *et al.*,

2002). L'importance du pH sur les phénomènes d'évolution de la matière organique, sur le cycle de l'azote (ammonification, nitrification), sur les formes de fixation du phosphore au niveau du sol, et leur assimilabilité, sur la solubilité ou l'insolubilité de nombreux éléments majeurs ou traces (fer, manganèse, zinc, cuivre, molybdène, bore, etc). La limitation de l'acidification est une condition nécessaire au maintien de l'équilibre des grandes fonctions physiques, chimiques et biologiques des sols (Ciesielski *et al.*, 2008).

2.1.5.1. Effet de l'acidité sur l'état physique du sol

L'acidité n'est généralement pas un facteur direct de croissance pour de nombreuses plantes supérieures. Le pH est plutôt l'indice de nombreuses propriétés qui jouent un rôle, soit dans l'alimentation des végétaux, soit dans la structure physique des sols, et en influencent la fertilité (Boyer, 1978). Les effets néfastes de l'acidité d'un sol sur la croissance des végétaux cultivés sont dus en grande partie aux actions défavorables sur le milieu physique, notamment sur la texture et la structure (Léonard *et al.*, 2001 ; Boizard *et al.*, 2004). Un sol qui s'acidifie devient plus difficile à travailler, car la macroporosité dominant sa perméabilité se réduit, et sa structure se dégrade (Agoumé et Birang, 2009). Cela entraîne un mauvais développement des racines et une mauvaise activité alimentaire due aux interactions s'exerçant entre les conditions physiques et chimiques (Warin *et al.*, 2004). Une acidité modérée n'entraîne pas une dégradation de la structure. La destruction des réseaux cristallins des argiles intervient à des pH inférieurs à 5 (Elsass, 2005).

Dans les sols ferrallitiques (ferralsols) et ferrugineux tropicaux (lixisols), le fer et la matière organique jouent le principal rôle dans la formation et le maintien de l'état structural. On a établi une liaison étroite entre structure et pH, ce qui permet de constater que les sols ferrallitiques à réaction voisine de la neutralité, ont une meilleure structure que les sols fortement désaturés. Le calcium est un des meilleurs facteurs de la stabilité structurale par son action sur la qualité de la matière organique (Vagën *et al.*, 2005). Les teneurs de calcium, et, dans une certaine mesure, celles de magnésium, conditionnent certaines propriétés du sol, dont le pH peut donner une estimation approchée : une nutrition azotée et phosphorique correcte, l'élimination des toxicités aluminiques et manganiques, en particulier, coïncident avec des pH peu acides ou neutres. Tout ceci implique la présence dans le sol de teneurs suffisantes, surtout en calcium, mais aussi en magnésium.

Pernes-Debuyser et Tessier (2002) ont montré que le sol est d'autant plus instable que son pH est bas. Les propriétés hydriques du sol sont dépendantes de l'environnement physico-chimique du sol et, notamment, de l'état des surfaces réactives du sol. L'influence du pH sur

les charges de surface des constituants confère au sol une plus ou moins grande affinité pour l'eau. La présence des cations de calcium agrégeant, conjuguée à la présence de nombreux sites d'échange, apparaît être à l'origine de cette stabilité des sols (Pernes-Debuyser et Tessier, 2002).

2.1.5.2. Action de l'acidité sur l'activité biologique du sol

Dans beaucoup de sols tropicaux à pH inférieur à 4,5, la décomposition de la matière organique s'arrête lorsque les teneurs en aluminium sont fortes (Segalen, 1973). Dans les sols acides, la matière organique se décompose mal et s'accumule ; le rapport C/N est élevé et les acides humiques qui prennent naissance sont peu favorables à la création d'une bonne structure. L'acidité influence la minéralisation de la matière organique ainsi que l'activité des micro-organismes (champignons, bactéries) et, partant, la fixation de l'azote et la nitrification (Boyer, 1978 ; Dabin, 1985). En effet, lors de la minéralisation de la matière organique, l'activité des bactéries ammonifiantes, très faible en milieu fortement acide (pH < 5), croît jusqu'à pH 6, et présente ensuite un pallier, tandis que celles des bactéries nitrifiantes continue de croître jusqu'à pH 7,5. Les bactéries fixatrices d'azote préfèrent les pH voisins de la neutralité, entre 6 et 7,5. Les bactéries symbiotiques du genre rhizobium dépérissent, puis meurent, lorsque le pH devient acide. On considère habituellement qu'un pH de 5 et en deçà n'est pas favorable à la survie de cette bactérie dans le sol, ni à l'infestation des racines des légumineuses cultivées. Résumant les caractéristiques physico-chimiques des sols ferrallitiques (ferralsols), Rabeharisoa (2004), évoque leur acidité, avec des pH souvent inférieurs à 5. Selon cet auteur, ces sols ont des teneurs en aluminium échangeable supérieures à $1 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$ de terre, une désaturation en cations échangeables autre que Al^{3+} et H^+ , avec une CEC inférieure à $5 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$, et surtout, une déficience très marquée en phosphore disponible. Ces caractéristiques ne favorisent que l'activité des champignons, surtout au début de la décomposition des matières organiques.

2.1.5.3. Effet de l'acidité sur l'état chimique du sol

Le pH du sol est un reflet relativement fidèle de la saturation du complexe adsorbant par les bases (Kopittke et Menzies, 2005). La diminution du pouvoir de fixation de cations peut être attribuée à un lessivage de l'argile, et, surtout, à un humus peu polymérisé, dominé par les acides fulviques, incapables de former un complexe argilo-humique (Soltner, 2005). Yeboua et Ballo (2000), rapportent que la quantité de cations métalliques fixés par le sol sous culture a baissé à cause de la lixiviation des bases (Ca^{2+} et Mg^{2+}), de l'exportation par les récoltes, et de l'action acidifiante des engrais. Selon Boyer (1978), l'acidification résulterait

de la libération d'ions H^+ par les racines des plantes, des processus de décomposition de la matière organique, des exportations par les récoltes, des mobilisations du Ca^{2+} par les engrais acidifiants, du lessivage qui, sous l'action de la gravité, élimine les cations métalliques du complexe d'échange et permet leur remplacement par des ions H^+ . Dès que le pH descend en dessous de 5, l'aluminium échangeable a tendance à devenir le cation le plus abondant du complexe adsorbant.

Le pH du sol est le principal facteur qui influence l'assimilation des oligo-éléments. L'assimilation diminue si le pH augmente pour la majorité des oligo-éléments (bore, cuivre, zinc, manganèse) (Boyer, 1978). Par contre, pour le molybdène, l'assimilation augmente en même temps que le pH.

2.1.5.3.1. Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique est la quantité totale des cations qu'un sol peut retenir par échange ionique dans des conditions standardisées (Ciesielski *et al.*, 2008). La CEC n'est pas constante pour un sol donné, mais elle varie en fonction du pH. Pour les analyses de routine, les auteurs préconisent, pour ces sols acides, la méthode d'extraction au cobaltihexamine à pH neutre, à la place des autres méthodes telle que la méthode de Metson, utilisée surtout pour les sols des régions tempérées, qui ne développent pas des charges variables de surface (Fallavier *et al.*, 1985). La valeur de la CEC, mesurée selon la méthode Metson, à pH 7, donne des informations sur la constitution du sol, notamment la contribution des argiles et des matières organiques (Rabeharisoa, 2004). En revanche, la CEC mesurée au pH du sol, permet de révéler les changements des propriétés du sol du fait des pratiques de fertilisation (Pernes-Debuyser et Tessier, 2002). Parmi les constituants du complexe adsorbant, les minéraux argileux possèdent des charges permanentes, cependant les groupes SiOH et AlOH des angles des cristaux, et aussi les groupes COOH et OH des matières organiques associées, libèrent des charges négatives supplémentaires (COO^- , SiO^- , AlO^-) lorsque le pH passe de l'acidité vers l'alcalinité.

Le complexe adsorbant est mesuré par la capacité d'échange qui, outre les cations basiques, fixe également des ions H^+ et Al^{3+} échangeables. La kaolinite, principal constituant de beaucoup de sols des régions inter-tropicales, possède une capacité d'échange faible (5 à 10 $cmol^+ kg^{-1}$ de sol), contrairement à l'illite (20 à 30 $cmol^+ kg^{-1}$ de sol), et surtout à la montmorillonite (80 à 120 $cmol^+ kg^{-1}$ de sol) et aux vermiculites (80 à 130 $cmol^+ kg^{-1}$ de sol). Toutefois, une argile de la famille de la kaolinite, l'halloysite, fréquente dans les sols dérivés de roches effusives, basalte par exemple, a une capacité d'échange voisine de celle de l'illite

(20 cmol⁺ kg⁻¹ de sol). La capacité totale d'échange du sol dépend plus des colloïdes organiques que de l'argile en quantité moindre, ou du type kaolinite, à faible capacité d'échange (Yeboua et Ballo, 2000).

Soltner (2005) souligne une absence de corrélation entre le pH et le taux de saturation du complexe adsorbant, pour les acidités comprises entre 4,5 et 5,5. Le sol doit son acidité à d'autres facteurs dont le principal pourrait être sa teneur en ions Al³⁺, souvent supérieure à celle des ions H⁺. L'augmentation de la toxicité aluminique peut être imputée à la baisse de teneurs en calcium, de celle de la matière organique et du complexe adsorbant (Namam *et al.*, 2001 ; Oorts *et al.*, 2003). La matière organique peut complexer les formes toxiques d'aluminium tandis que le calcium produit le même effet par précipitation des ions Al³⁺.

Sans négliger l'importance du suivi des valeurs du pH dans l'évolution des propriétés du sol, la valeur de la CEC et le dosage des cations échangeables mesurés au pH du sol, apparaissent être de précieux indicateurs de l'évolution des propriétés des sols (Pernes-Debuyser et Tessier, 2002).

2.1.5.3.2. Action de l'acidité du sol sur la disponibilité des éléments

L'acidité du sol peut être à l'origine d'interactions chimiques dans le sol, provoquant soit une insolubilisation de certains éléments, soit une dissolution trop forte de certains autres, qui produisent des phénomènes de toxicité. L'insolubilisation par l'excès d'acidité se produit pour le molybdène et le phosphore, qui est bloqué par le fer (Fe³⁺). La solubilité des ions Fe³⁺, Al³⁺ et Mn³⁺ est accentuée au point de conduire à des phénomènes de toxicité. Un pH situé entre 6 et 7, adapté à l'assimilation du phosphore, paraît être le plus favorable à la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes (Martin-Prével *et al.*, 1984). Les propriétés du complexe adsorbant sont modifiées par la présence d'aluminium échangeable. C'est un élément hautement toxique et préjudiciable aux cultures dans beaucoup de sols tropicaux, dès lors qu'une réaction fortement acide du sol permet sa fixation à fortes teneurs sur le complexe adsorbant (Boyer, 1982). Pour des pH eau inférieurs à 5,8, les ions Al³⁺ deviennent solubles, avec des risques de toxicité pour les plantes (Wright, 1989).

2.1.5.4. Action de l'acidité sur l'absorption des éléments par la plante

Sur un sol acide, la présence en quantité exagérée de certains ions peut empêcher l'absorption d'autres ions en plus faible quantité dans le milieu nutritif. Le pH au voisinage des racines a une grande importance dans l'absorption des éléments nutritifs par les plantes cultivées. Selon Callot *et al.* (1983), les racines prélèvent les minéraux indispensables à la plante de façon sélective : les cellules végétales choisissent certains éléments et s'opposent à

l'accumulation d'autres ; la composition minérale des tissus est ainsi très différente de celle du milieu où le végétal s'est développé. En effet, la sélectivité de l'absorption implique que le prélèvement effectué par les racines modifie le substratum dans lequel elles se développent.

L'assimilabilité d'un élément est fonction de son état chimique et des conditions physico-chimiques du milieu. Ainsi, le fer n'est assimilable qu'à l'état d'ions ferreux et à des pH voisins de la neutralité. Le phosphore est assimilé sous forme d'anion phosphate monovalent, et il est nécessaire que le milieu présente une faible concentration en Fe^{3+} et Ca^{2+} , pour permettre la formation de phosphates insolubles. Le potassium est assimilable si les ions K^+ ne sont pas trop fortement liés aux argiles. L'acidité du sol agit sur la plante par ses composantes principales que sont le pH et l'aluminium échangeable. Des pertes en potassium, dans ces conditions, par les racines des plantes ont été signalées (Dakouo, 1994). Ce phénomène, accentué par les hautes températures, est particulièrement actif en zone tropicale. L'influence de l'acidité sur l'enracinement se traduit par une réduction du front racinaire limité dans les horizons superficiels (Boyer, 1982).

La fréquence et l'intensité des toxicités induites par l'aluminium échangeable handicapent très sérieusement le potentiel agricole de nombreux sols tropicaux. Outre l'absence de réponse des sols aux engrais, en dessous d'un taux de 0,6% de matière organique, Berger *et al.* (1987) ont observé un blocage du développement des cotonniers dès le 30^e jour, sur un sol dont les teneurs en aluminium échangeable sont comprises entre 0,10 et 0,20 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ de sol, et un pH inférieur à 5. La correction de la toxicité ne peut se faire uniquement par l'apport de matière organique ; si le sol ne contient pas de réserves en bases et en acides fulviques libres, l'amendement calco-magnésien devient alors indispensable.

2.1.5.5. Effets de l'acidité sur les cultures et les rendements

L'acidité du sol fait partie des facteurs environnementaux importants qui peuvent influencer la croissance des plantes et limiter la production végétale. Les effets néfastes de l'acidité sur la croissance des végétaux cultivés sont dus aux actions défavorables sur le milieu physique, sur l'activité microbienne, sur l'assimilabilité des éléments majeurs et des oligo-éléments (Boyer, 1978). Un pH acide indique généralement un sol désaturé en bases, donc à faibles teneurs en calcium et magnésium. Par contre, un pH nettement supérieur à 7,5 est le signe de la présence, soit de carbonates libres, générateurs de chlorose ferrique, soit le plus souvent, de sodium fixé sur le complexe adsorbant. Dès que le rapport $(\text{Na}/\text{Ca}) \times 100$ dépasse 3, on observe une nette péjoration de la structure et, partant, une difficulté d'enracinement des cultures.

Etant donné le nombre de facteurs physiologiques impliqués, il est impossible d'établir une corrélation exacte entre le développement des plantes supérieures et le pH des sols. La plupart des plantes cultivées sous les tropiques sont assez tolérantes au pH du sol ; c'est le cas des plantes comme le riz, le maïs, l'arachide et le sorgho, qui paraissent supporter sans trop de difficultés une gamme de pH allant de 4 à 7,5. On a toutefois remarqué que les rendements variaient sensiblement en fonction du pH du sol (Boyer, 1978). A Madagascar, le rendement du maïs cultivé sur les sols acides est passé de 52 à 35 quintaux pour, respectivement, des pH de 4,08 et 3,67 (Boyer, 1978). Le cotonnier se révèle toujours sensible à la réaction du milieu, ce qui a permis à Dabin (1985) de dresser une échelle des rendements en fonction du pH. Sur des sols acides en zone cotonnière Ouest, Hien (1990), a noté, après 19 années de culture, une faible efficacité des engrais minéraux sur les rendements, même appliqués à de fortes doses.

2.2. Correction de l'acidité du sol

Pour maintenir le pH du sol à un niveau satisfaisant, diverses solutions peuvent être envisagées, mais le plus important est de compenser régulièrement les pertes d'éléments minéraux sur le complexe adsorbant (Soltner, 2005). Un rôle important est assuré par les amendements organiques, calco-magnésiens et phosphatés apportés au sol. Ciesielski *et al.* (2008) ont utilisé le pH initial du sol et sa teneur en carbone organique pour estimer les doses de carbonate de calcium à apporter, afin d'amener son pH à une valeur donnée. C'est sur l'acidité potentielle qui est le réservoir des ions H^+ , c'est-à-dire sur le complexe adsorbant, qu'il faut agir pour améliorer indirectement le pH de la solution du sol, en apportant un amendement calcique. Pour maintenir le pH d'un sol à un niveau satisfaisant, il faut compenser régulièrement les pertes et ne pas se contenter d'un important apport exceptionnel.

En général, on considère qu'un apport de calcaire relevant le pH au moins à 5,5 élimine les risques de toxicité manganique, sauf dans le cas particulier où le calcium développe un antagonisme ionique à l'encontre du manganèse. Divers travaux sur les amendements à base de dolomie et de Burkina phosphate ont permis de montrer l'intérêt, à plus ou moins long terme, de leur apport sur le sol et les rendements des cultures (Stevens *et al.*, 2005). Selon Deckers (1993), les amendements calciques appliqués rationnellement constituent l'un des plus importants facteurs de fertilité et de productivité des sols acides. L'application de la dolomie à raison de 2500 kg ha⁻¹ neutralise l'aluminium échangeable, augmente très sensiblement la CEC et est suivie d'une remontée du pH de 0,8 (Bado *et al.*, 1997). De plus, cette dose de dolomie augmente la production des cultures grâce à l'amélioration de la nutrition calcique et magnésienne. La dolomie semble plus efficace et

augmente beaucoup plus les rendements du cotonnier par rapport au sorgho (Bado, 2002). Cela peut s'expliquer par la sensibilité des deux cultures à l'acidité. Le cotonnier est plus sensible à l'acidité, expliquant de ce fait une efficacité plus accrue de la dolomie (Berger *et al.*, 1987 ; Bado *et al.*, 1993). De nombreux auteurs ont révélé le rôle bénéfique d'un apport de calcaire sur l'assimilabilité du phosphore dans les sols acides (Gascho et Parker, 2001).

Les amendements calco-magnésiens sont des amendements basiques permettant d'augmenter le pH d'un sol. Ces amendements permettent de réduire la toxicité aluminique par un effet antagoniste à l'aluminium, ou par le déplacement de l'aluminium du complexe adsorbant, ce qui neutralise l'acidité du sol. Le relèvement du pH induit par ces amendements calco-magnésiens, élimine tout risque de toxicité, réduit notamment la nocivité du manganèse, augmente l'assimilabilité du molybdène, et favorise l'absorption du phosphore (Kaitibie *et al.*, 2002). Les amendements basiques contribuent à l'amélioration de la stabilité structurale, ce qui induit une colonisation accrue du sol par les racines. Sur l'activité biologique, l'augmentation du pH du sol modifie les populations microbiennes.

Un autre caractère fréquent des sols tropicaux est que la capacité de stockage de nutriments dépend du pH. Des applications régulières modestes de chaux peuvent élever le pH de la zone racinaire, contrariant la toxicité aluminique, et réduire la fixation des phosphates tout en augmentant l'état nutritif du sol (Deckers, 1993).

D'après Ritchie (1989), l'aluminium formerait des espèces polymères avec les phosphates. Cet auteur a mis en évidence l'existence de formes spécifiques solubles d'hydroxyde d'aluminium et de phosphate, à pH variant de 4,1 à 4,8, et à des concentrations respectives d'aluminium et de phosphate inférieures à 100 et 25 μM . Le chaulage est une pratique très souvent utilisée pour relever le pH des sols et baisser la toxicité de l'aluminium. Il permet, par son action, de rehausser le niveau de production des cultures. Cependant, Rabeharisoa (2004) a montré qu'à cause de la libération de calcium lors de la solubilisation des phosphates naturels, les sols contenant une grande quantité de calcium peuvent diminuer la vitesse de dissolution de ces phosphates. Ceci indique que le niveau de chaulage doit être choisi avec prudence, afin d'éviter son effet négatif sur la dissolution de la roche phosphatée dans les sols acides.

Les restitutions organiques par des apports de fumier ou compost, contribuent à améliorer les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol (Ciesielski *et al.*, 2008). En outre, ces restitutions améliorent la disponibilité des éléments comme le phosphore, tout en fournissant des éléments nutritifs par minéralisation (Bationo et Mokwunye, 1991 ; Bationo *et al.*, 2004). Le maintien de la fertilité des sols en zone soudanienne paraît reposer

principalement sur la protection du complexe argilo-humique (Berger *et al.*, 1987). Dans une expérimentation de longue durée conduite à la station de recherche de Farako-Bâ au Burkina Faso, Bado *et al.* (1997), ont observé l'efficacité remarquable du fumier sur la neutralisation de l'acidité et de l'aluminium échangeable. En neutralisant la faible acidité des sols et en apportant des éléments nutritifs aux plantes, le fumier améliore la nutrition minérale, entraînant une augmentation des rendements des cultures.

DEUXIEME PARTIE

SITES D'ETUDE, MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE 3. SITES D'ETUDE, MATERIEL ET METHODES

Ce travail a été réalisé en trois principales phases visant d'une part, à déterminer les facteurs d'acidification des sols de la zone cotonnière et, d'autre part, à prévenir ce problème. Au cours de la première phase, un diagnostic des facteurs majeurs contribuant à l'acidification des sols a été réalisé. Pour lutter contre l'acidification, dans les deuxième et troisième phases, une évaluation de l'efficacité des amendements calco-magnésiens a été faite, complétée par une analyse de l'effet de la gestion des résidus de récolte sur l'acidification et les propriétés des sols dans une rotation coton-maïs-sorgho.

3.1. Sites d'étude

Les expérimentations ont été menées sur deux sites en milieu semi-contrôlé et sur trois sites en milieu paysan (Figure 5). En milieu semi-contrôlé, les travaux ont été réalisés sur la station de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) de Farako-bâ et sur la ferme expérimentale de Boni, pendant, respectivement, trois et 25 années. Les travaux en milieu paysan, ont été réalisés durant deux années, sur les sites de Boni, de Dohoun et de Balla (Figure 5).

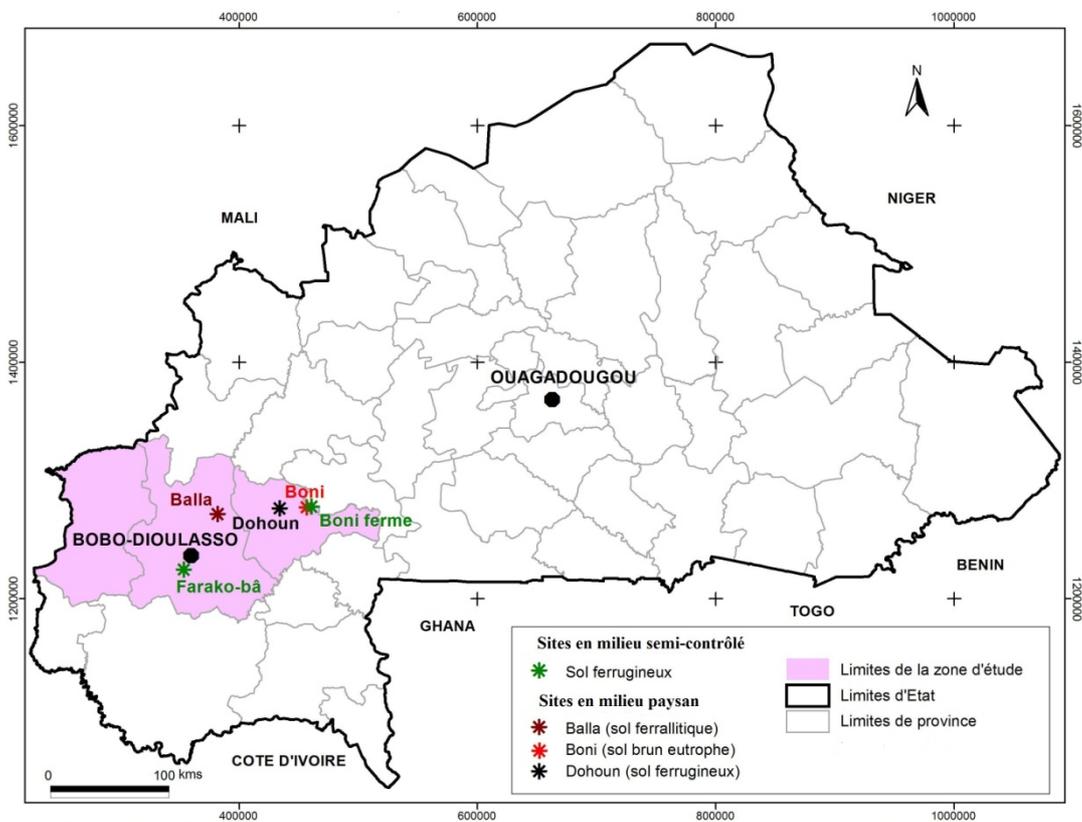


Figure 5. Localisation des sites d'étude

3.1.1. Sites en milieu semi-contrôlé

3.1.1.1. Station de Farako-bâ

La station de recherches agricoles de Farako-bâ est localisée à 4°20' de longitude Ouest et 11°06' de latitude de Nord, et à une altitude de 405 m. Le climat est de type sud soudanien et les pluviométries enregistrées sont de 816,7 mm en 2004, 869,4 mm en 2005 et 946,7 mm en 2006. Le sol est ferrugineux tropical (lixisol) et de texture limono-argileuse. Les teneurs en limon, argile et sable sont, respectivement, de 712, 159 et 129 g kg⁻¹ sur l'horizon 0-20 cm. Ce sol est non seulement pauvre en matière organique (0,8%), mais il est acide, avec un pH eau de 5,4, carencé en phosphore (P Bray 1 = 0,72 mg kg⁻¹) et en potassium disponible (23,5 mg kg⁻¹). La somme des bases échangeables (2,48 cmol⁺ kg⁻¹) et la CEC (4,5 cmol⁺ kg⁻¹), révèlent la pauvreté en réserves minérales du complexe adsorbant du sol (Annexe 1).

3.1.1.2. Ferme expérimentale SOFITEX de Boni

Elle est située dans la zone cotonnière ouest du Burkina Faso (3°26' de longitude Ouest, 11°32' de latitude Nord et 302 m d'altitude) sur un sol ferrugineux tropical remanié, induré sur matériaux gravillonnaires (lixisol) (Kaloga, 1969). Le climat est du type sud-soudanien, avec une saison pluvieuse allant de mai à octobre et une saison sèche de novembre à avril (Guinko, 1984). La pluviométrie moyenne du site de Boni varie entre 800 et 1000 mm, répartis sur 40 à 75 jours de pluie. Son évolution et le nombre de jours de pluie enregistrés par an, durant la période de 1982 à 2006, sont présentés sur la figure 6.

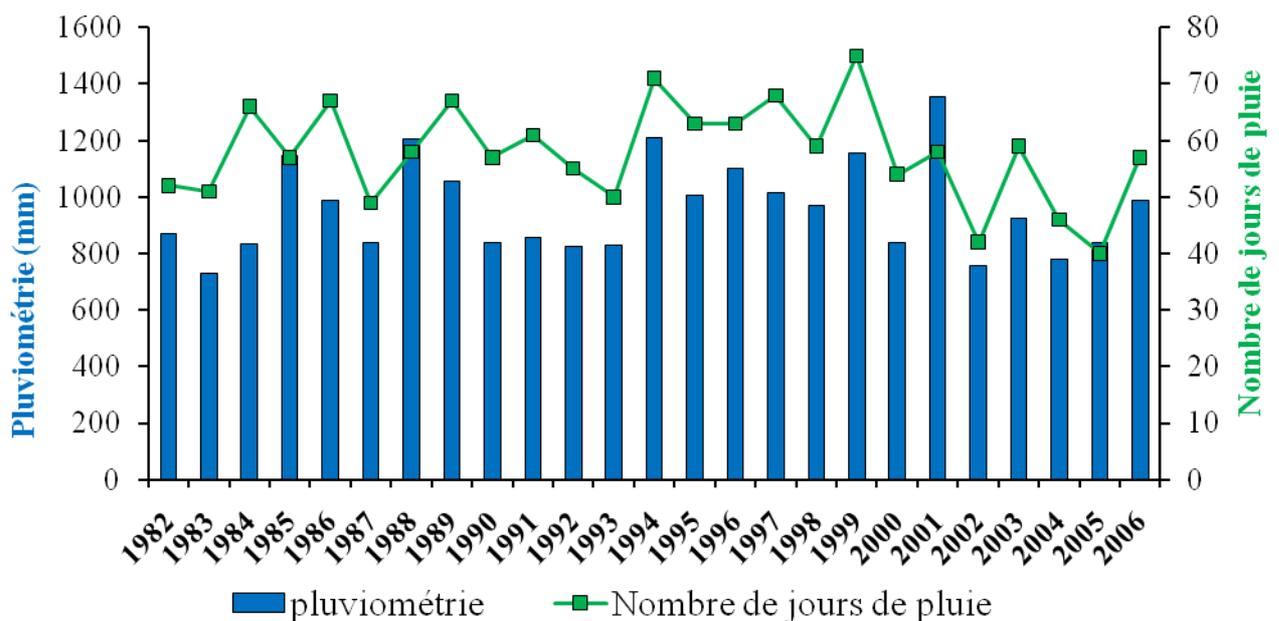


Figure 6. Pluviométrie et nombre de jours de pluie à Boni de 1982 à 2006.

Cette pluviométrie, souvent mal répartie, est très irrégulière, avec des années excédentaires où la pluviométrie est supérieure à 1100 mm et des années très déficitaires où elle est inférieure à 800 mm (Annexe 2). Les déficits pluviométriques occasionnent des retards de semis et peuvent fortement compromettre les rendements des cultures.

3.1.2. Sites en milieu paysan

3.1.2.1. Site de Boni

Il présente les coordonnées géographiques 11° 32' 466'' de latitude Nord, 3° 23' 638'' de longitude Ouest et 349,3 m d'altitude. Les sols bruns eutrophes (cambisols) ont été retenus pour l'étude sur ce site dont la pluviométrie, en 2006, était de 987 mm répartis sur 57 jours de pluie, et de 834 mm en 2007. Le matériau parental de ces sols est constitué de roches sédimentaires schisteuses, et de roches volcaniques. Les schistes, dont la composition chimique est résumée dans le tableau I, sont riches en oxydes d'aluminium (38,5%), en potassium (30,8%), mais relativement peu pourvus en oxydes de fer, et pauvres en calcium (0,54%).

Tableau I. Composition chimique des roches-mères des sols étudiés

Composantes	Schiste	Latérite	Grès
	Sol brun eutrophe (cambisol) de Boni	Sol ferrugineux (lixisol) de Dohoun %	Sol ferrallitique (ferralsol) de Balla
SiO ₂	5,27	1,29	19,16
Al ₂ O ₃	38,51	57,46	13,59
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	13,68	2,25	140,99
Fe ₂ O ₃	14,46	26,10	10,06
Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃	266,32	220,15	135,09
K ₂ O	30,83	6,20	20,83
MgO	4,20	3,25	21,33
CaO	0,54	0,16	5,02
Na ₂ O	0,43	0,24	5,39
MnO	0,53	0,99	1,83
TiO ₂	0,08	0,61	0,13
P ₂ O ₅	4,79	3,14	0,80

Les données du tableau sont issues de l'analyse d'échantillons de roches prélevées dans les sites d'étude

3.1.2.2. Site de Dohoun

Ce site a pour coordonnées géographiques 11° 31' 549'' de latitude Nord, 3° 36' 263'' de longitude Ouest et 327,3 m d'altitude. Les sols sont du type ferrugineux tropical lessivé (lixisol). La pluviométrie et le nombre de jours de pluie en 2006 et 2007 étaient de 937 et 1022 mm, sur, respectivement, 63 et 46 jours sur ce site. Ces sols ferrugineux sont issus de l'altération de cuirasses ferrugineuses latéritiques, riches en sesquioxydes de fer et d'alumine. La latérite, avec, respectivement, des teneurs en magnésium et en calcium de 3,25 et 0,16%, est pauvre en ces deux éléments (Tableau I).

3.1.2.3. Site de Balla

Le site de Balla (11° 29' 902'' de latitude Nord, 4° 07' 088'' de longitude Ouest et 315 m d'altitude) est situé à environ 45 km au Nord Est de Bobo-Dioulasso. Les sols sur ce site, sont des sols ferrugineux tropicaux (lixisols) mais des sols ferrallitiques (ferralsols) sont rencontrés. Sur ce site, l'étude a porté sur les sols ferrallitiques (ferralsols). La pluviométrie et le nombre de jours de pluie en 2006 et 2007, sur ce site, étaient, respectivement, de 1084 et 754 mm sur 49 et 31 jours. Les sols ferrallitiques (ferralsols) sont formés à partir de matériaux gréseux dont la composition chimique révèle des teneurs relativement faibles en oxydes d'aluminium et de fer (Tableau I). En revanche, le grès se révèle riche en potassium, en magnésium et en manganèse (1,8%).

3.2. Matériel d'étude

3.2.1. Matériel végétal

3.2.1.1. Cotonnier

Le cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.), dont la variété FK37 est vulgarisée et cultivée dans la zone cotonnière Ouest du Burkina Faso, a été utilisé sur le site de Farako-bâ, en station de recherche, et sur les sites de Boni et de Dohoun, en milieu paysan. Cette variété de cotonnier dont le cycle est de 150 jours, se caractérise par son port élané, une production en coton graine supérieure à 1800 kg ha⁻¹ en station et un rendement égrenage de 43,4%. La variété de cotonnier FK 290, dont le rendement potentiel est estimé à 3000 kg ha⁻¹, a été utilisée en milieu paysan, sur le site de Balla.

De 1982 à 2006, les variétés de cotonnier, MK 73, L.299.10.75, ISA 205 G, STAM 42, F 135, STAM 59 A, FK 290 et FK 37 ont été utilisées en milieu semi-contrôlé, sur la ferme de Boni. Les potentiels de rendements moyens de ces variétés de cotonnier sont de 3 à 4 t ha⁻¹, pour un cycle semis-maturité de 150 jours.

3.2.1.2. Maïs

La variété améliorée de maïs (*Zea mays* L.) dénommée FBC 6, dont le cycle est de 110 jours et la productivité de 4500 kg ha⁻¹ de maïs grain, a été utilisée sur l'ensemble des sites d'étude en milieu paysan et à Farako-bâ.

Les variétés de maïs, IRAT 171, SR 22 et SR 21 ont été utilisées sur le site de la ferme de Boni, en milieu semi-contrôlé. Les potentiels de rendements moyens de ces variétés sont de 4 à 5 t ha⁻¹, pour un cycle semis-maturité de 105 jours.

3.2.1.3. Sorgho

Une variété locale de sorgho (*Sorghum bicolor* L.), appelée Sariasso 01 a été utilisée à Farako-bâ, tandis que les variétés, Gnoffing et Sariasso 01, ont été utilisées sur la ferme de Boni, en milieu semi-contrôlé. Les potentiels de rendements moyens de ces variétés sont de 2 à 3 t ha⁻¹, pour un cycle semis-floraison de 95 jours.

3.2.2. Amendements

La dolomie a été utilisée en amendement sur le site de Farako-bâ, en station de recherche, et sur les trois sites, en milieu paysan. Cet amendement provient du gisement de Tiara au Burkina Faso, exploité par la compagnie villageoise d'exploitation minière (COVEMI). Cette dolomie, composée de 27% de CaO et 19% de MgO, présente une granulométrie comprise entre 53 et 106 µm pour 34% de ce produit (Koulibaly, 2005).

Le phosphate naturel tricalcique du Burkina (Burkina phosphate) a été utilisé sur les sites de Farako-bâ, de la ferme expérimentale SOFITEX de Boni, et sur les trois sites en milieu paysan. Le Burkina phosphate est extrait du gisement de Kodjari au Burkina Faso et contient 25% de P₂O₅ et 35% de CaO ; plus de la moitié de ce produit (52,6%) a une granulométrie comprise entre 53 et 106 µm.

Le compost utilisé en milieu semi-contrôlé à Farako-bâ a été obtenu à partir des tiges de cotonnier préalablement broyées à l'étable et mélangées aux déjections des bœufs, puis compostées dans une fosse. Les composts utilisés sur les sites en milieu paysan (Boni, Dohoun et Balla), ont été ceux fabriqués localement par les producteurs, à partir de divers résidus de récolte. La composition moyenne des substrats organiques est résumée dans le tableau II.

Tableau II. Composition chimique des composts utilisés en station de recherche et en milieu paysan

Caractéristiques	Site en station de recherche	Sites en milieu paysan		
	Farako-bâ	Boni	Dohoun	Balla
C total (g kg ⁻¹)	225,58	234,29	174,34	117,49
N total (g kg ⁻¹)	13,0	9,96	11,47	8,87
C/N	17,35	23,52	15,20	13,25
P total (g kg ⁻¹)	3,0	14,5	9,92	12,21
C/P	75,20	16,2	17,6	9,6
K total (g kg ⁻¹)	12,0	28,2	7,23	7,95
S total (g kg ⁻¹)	3,0	1,72	2,14	0,20
Ca total (g kg ⁻¹)	-	14,27	8,11	4,75
Mg total (g kg ⁻¹)	-	7,31	1,63	1,38
Ca/Mg		1,95	4,98	3,44

- : valeur non déterminée.

Le compost et le fumier utilisés sur le site de la ferme expérimentale SOFITEX de Boni, résultent de la transformation des tiges de sorgho après broyage et enrichissement à l'étable (Tableau III).

Tableau III. Caractéristiques chimiques du compost et du fumier issus du recyclage des tiges de sorgho

Caractéristiques	Compost*	Fumier**
C total (g kg ⁻¹)	285,02 ± 34,04	287,57 ± 52,64
N total (g kg ⁻¹)	22,18 ± 5,98	22,18 ± 0,91
C/N	13,32 ± 2,38	12,97 ± 2,38
P total (g kg ⁻¹)	19,28 ± 5,55	10,69 ± 2,02
C/P	14,78	26,90
K total (g kg ⁻¹)	17,71 ± 4,32	17,59 ± 8,22
S total (g kg ⁻¹)	3,11 ± 0,91	2,99 ± 0,74
Ca total (g kg ⁻¹)	14,63 ± 3,30	14,30 ± 2,40
Mg total (g kg ⁻¹)	6,54 ± 2,26	5,97 ± 0,91
Ca/Mg	2,24	2,40

* : Recyclage en compost des tiges de sorgho broyées par les bœufs puis compostées en tas.

** : Recyclage en fumier par la technique du parc d'hivernage des tiges de sorgho broyées par les bœufs.

3.2.3. Engrais minéraux

L'engrais minéral coton renfermant les éléments N, P, K, S et B, de formule 14-18-18-6-1 et l'urée $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (46% N) ont été utilisés sur la station de Farako-bâ et sur les trois sites en milieu paysan.

L'urée à 46% de N, le chlorure de potassium (KCl) à 60% de K_2O , le sulfate de potassium (K_2SO_4) à 48% de K_2O et 18% de S et la boracine contenant 1% de B_2O_3 , ont été utilisés pour la fertilisation minérale du cotonnier, du maïs et du sorgho, sur le site de la ferme expérimentale SOFITEX de Boni.

3.3. Méthodes d'étude

3.3.1. Caractérisation de l'acidification sur trois types de sols en zone cotonnière

Ouest du Burkina Faso

Dans cette partie de l'étude, ont été analysées les caractéristiques physico-chimiques des sols pour apprécier l'état de l'acidité, et surtout, pour dégager les facteurs d'acidification des sols en relation avec les systèmes de culture pratiqués. Les travaux ont été conduits pendant deux années consécutives (2006 et 2007) en milieu paysan, et sur trois types de sols.

3.3.1.1. Facteurs étudiés

Deux facteurs ont été étudiés dans ce travail, à savoir : la nature des sols d'une part, et leurs modes d'exploitation, d'autre part.

3.3.1.1.1. Types de sols étudiés

L'étude a été réalisée sur trois types de sol, qui sont à la fois prédominants et représentatifs de la zone cotonnière. Selon la classification française des sols (CPCS, 1967), il s'agit des sols bruns eutrophes tropicaux sur matériaux argileux pour le site de Boni, des sols ferrugineux tropicaux lessivés, pour le site de Dohoun, et des sols ferrallitiques faiblement désaturés sur matériaux sableux, pour le site de Balla. Selon la classification des sols de la « World Reference Base (WRB) for soil resources », ils correspondent, respectivement, aux cambisols, aux lxisols et aux ferralsols (FAO, 2006).

3.3.1.1.2. Modes d'exploitation des terres

Les modes d'exploitation des terres constituent le second facteur étudié sur chacun des trois types de sol. Les modes d'exploitation des terres permettent de distinguer d'une part, les sols sous jachère et, d'autre part, les sols cultivés. Au niveau des sols cultivés de la zone cotonnière, ont été retenus les sols sous culture attelée et les sols sous culture motorisée, qui

sont travaillés, respectivement, par la traction bovine et par le tracteur. A partir des sols sous jachère et des sols cultivés, les modes d'exploitation des terres ont été ainsi définis :

1- sol sous jachère naturelle : parcelle mise en jachère pendant 10 à 15 années, sans aucune introduction d'espèce végétale améliorante. Les jachères occupent d'assez faibles superficies et sont parfois pâturées ;

2- sol en culture attelée : parcelle sous exploitation continue durant 20 à 30 années en utilisant la traction bovine pour le travail du sol et en effectuant des opérations de désherbage et de buttage. Le système de culture est basé sur des rotations coton-céréales ; les céréales étant souvent associées à l'arachide et au niébé. Les pesticides (herbicides et insecticides) et les engrais minéraux sont utilisés pour la production du coton et du maïs. Les autres cultures (sorgho, légumineuses et sésame) ne sont généralement pas fertilisées ;

3- sol en culture motorisée : parcelle mise en culture continue pendant 15 à 30 années. Les opérations de travail du sol sont réalisées avec des tracteurs dont la puissance varie entre 40 et 60 CV. La culture attelée était pratiquée sur ces parcelles avant l'acquisition des tracteurs. Le désherbage et le buttage sont assurés par la traction bovine. L'utilisation des intrants est plus importante et concerne les herbicides, les insecticides et les engrais minéraux.

3.3.1.2. Evaluation de l'acidification par l'analyse d'échantillons composites de sol

Un diagnostic préliminaire basé sur l'historique des parcelles en 2006, a permis de prélever 96 échantillons de sol selon les facteurs étudiés, antérieurement définis. Ces prélèvements de sol ont été réalisés à la tarière, aux profondeurs de 0-20 et 20-40 cm, et, suivant les modes d'exploitation des terres sur chaque type de sol. On a prélevé 24 échantillons de sol à Boni et 36 échantillons sur chacun des sites de Dohoun et de Balla. Sur les parcelles retenues, les échantillons de sol ont été prélevés suivant les diagonales, en six points distants de 50 à 80 mètres. Les sols ainsi prélevés à chaque niveau de profondeur ont été mélangés pour constituer des échantillons composites qui ont été séchés à l'air, puis tamisés à 2 mm, avant d'être analysés au laboratoire pour la caractérisation de leur acidité.

3.3.1.3. Evaluation de l'acidification du sol par l'étude pédologique

Sur les trois types de sol, l'étude pédologique a été conduite en fonction des modes d'exploitation des terres. Les prospections ont porté sur un total de 11 profils pédologiques dont trois à Boni et quatre sur chacun des sites de Dohoun et Balla. Les fosses pédologiques ont été creusées selon les normes en vigueur au Bureau National des Sols du Burkina Faso (Bunasols, 1987).

La description des profils a été faite selon les Directives FAO (1994) et les sols ont été classifiés selon le système français (CPCS, 1967). Les couleurs des sols ont été déterminées à l'aide du code Munsell (1975). Les échantillons de sol prélevés aux différentes profondeurs du profil sont conservés séparément. Ces échantillons sont ensuite tamisés à 2 mm après séchage à l'air, puis analysés au laboratoire.

3.3.1.4. Paramètres déterminés

Les échantillons de sols prélevés ont été analysés au laboratoire afin de déterminer les caractéristiques physiques (granulométrie 3 fractions) et chimiques (carbone, azote, phosphore total et phosphore assimilable, somme des bases échangeables, capacité d'échange cationique). En plus du pH eau et du pH KCl, l'acidité d'échange et l'aluminium échangeable ont été déterminés en vue d'évaluer l'acidité de ces sols.

3.3.2. Effet des amendements calco-magnésiens locaux sur l'acidité, les propriétés chimiques et biologiques du sol

Dans cette partie de l'étude, des amendements calco-magnésiens ont été appliqués selon les recommandations en vigueur des services techniques pour lutter contre l'acidification des sols. Les effets de ces amendements sont évalués sur la nutrition minérale, les rendements, les propriétés chimiques et biologiques des sols. Il s'agit de vérifier l'aptitude des amendements à corriger l'acidification du sol dans les systèmes de culture basés sur l'exportation des résidus de récolte. Les expérimentations ont été réalisées en station de recherche à Farako-bâ, pendant trois années (2004, 2005 et 2006), et en milieu paysan pendant deux années successives (2006 et 2007) à Boni, Dohoun et Balla.

3.3.2.1. Dispositif expérimental

Aussi bien en station de recherche qu'en milieu paysan, les mêmes traitements ont été appliqués. Il s'agit des traitements présentés dans le tableau IV, qui correspondent à des amendements appliqués en fumure de fond, uniquement en première année d'étude.

Tableau IV. Traitements comparés

T1 - Témoin sans amendement
T2- Apport de 6 t ha ⁻¹ de compost au hersage
T3- Apport de 0,3 t ha ⁻¹ de Burkina phosphate au hersage
T4- Apport de 1,5 t ha ⁻¹ de dolomie au hersage

Sur la station de recherche de Farako-bâ, en milieu semi-contrôlé, un dispositif statistique en blocs de Fisher a été implanté avec les quatre traitements répétés quatre fois. Sur

chacun des trois sites en milieu paysan, un dispositif en blocs randomisés comportant les quatre traitements répétés deux fois, a été implanté uniquement dans les exploitations en culture attelée.

La superficie des parcelles élémentaires correspondant aux traitements est de 160 m² (20 m x 8 m), soit 10 lignes de 20 m, sur le site en milieu semi-contrôlé, et de 320 m² (20 m x 16 m), subdivisés en 20 lignes de 20 m, sur les sites en milieu paysan.

En station de recherche, la succession des cultures sur le site de Farako-bâ, pendant les trois années successives, correspond à la rotation coton-maïs-sorgho. En milieu paysan, la rotation coton-maïs, a été pratiquée sur chaque site pendant les deux années successives.

3.3.2.2. Conduite des travaux

Chaque année, avant la mise en place des cultures, un labour du sol a été effectué au tracteur en station de recherche et par la traction bovine en milieu paysan. Le compost, le Burkina phosphate et la dolomie ont été enfouis par un hersage avant le semis du coton en première année. En station de recherche à Farako-bâ, le semis du coton a été réalisé le 22 juin 2004, celui du maïs en deuxième année d'étude a été réalisé le 4 juillet 2005, tandis que le sorgho utilisé en troisième année, a été semé le 6 juillet 2006. En milieu paysan (Boni, Dohoun et Balla), les semis ont été réalisés en 2006 et en 2007, entre le 15 juin et le 2 juillet pour le coton, et le maïs cultivés, respectivement, en première et en deuxième année.

Toutes les cultures ont été semées à des écartements de 0,40 m entre les poquets et de 0,80 m entre les lignes, puis démarquées à 2 plants par poquet, soit une densité théorique de 62 500 plants par hectare. Tous les traitements ont reçu une fumure minérale uniforme de 44 N, 34,5 P₂O₅, 21 K₂O, 9 S et 1,5 B₂O₃ par hectare sur le coton, le maïs et le sorgho. Cette fertilisation minérale correspond à 150 kg ha⁻¹ d'engrais coton appliqué 15 jours après la levée, complétés par 50 kg ha⁻¹ d'urée apportés 40 jours après la levée des cultures.

Les désherbages ont été réalisés à la demande et un buttage a été effectué 45 jours après la levée. Le programme de protection phytosanitaire vulgarisé en culture cotonnière a été suivi en appliquant le Profénofos (500 g ha⁻¹), 30 et 44 jours après la levée des cotonniers, l'association «Lamdacyalothrine (12 g ha⁻¹)-Profénofos (200 g ha⁻¹) » aux 58^e et 72^e jours, puis l'association «Cyperméthrine (36 g ha⁻¹)-Acétamipride (8 g ha⁻¹) » aux 86^e et 100^e jours (Drabo, 2005).

3.3.2.3. Paramètres mesurés

3.3.2.3.1. Caractéristiques physico-chimiques des sols des sites d'étude

Les caractéristiques physiques (granulométrie 3 fractions) et chimiques (carbone, azote, phosphore total, phosphore assimilable, bases échangeables, la CEC, le pH eau, le pH KCl) du sol ont été déterminées sur des échantillons prélevés à la tarière sur trois horizons (0-20, 20-40 et 40-60 cm) et sur deux horizons (0-20 et 20-40 cm) avant l'application des amendements sur les sites, tant en station de recherche à Farako-bâ, qu'en milieu paysan. En milieu paysan, des prélèvements de sol sur les profondeurs 0-20 et 20-40 cm, ont été effectués en 2007, après les récoltes. Pour chaque niveau de prélèvement, un échantillon composite constitué de 6 prises élémentaires de sol a été utilisé. Les échantillons de sol ont été séchés à l'air, puis tamisés à 2 mm avant leur analyse.

3.3.2.3.2. Nutrition minérale des cultures en station de recherche

Afin de suivre l'évolution des teneurs des cotonniers en azote et en phosphore, on a réalisé sur la station de Farako-bâ, à 30, 45 et 60 jours après le semis, des prélèvements de pétioles par des diagnostics pétiolaires selon la méthode américaine adaptée par l'IRCT (Braud, 1972). Au 70^e jour après les semis, un diagnostic foliaire (Braud, 1984) a été réalisé pour évaluer la nutrition globale des cotonniers par les fonctions de production en azote [F(N)], phosphore [F(P)], potassium [F(K)] et soufre [F(S)]. Les feuilles prélevées sont celles situées à l'aisselle d'une fleur ouverte se trouvant sur le premier nœud d'une branche fructifère le jour du prélèvement. On note le niveau de floraison qui est le rang moyen des branches fructifères sur lesquelles les feuilles ont été prélevées. Sur chaque traitement, 100 feuilles sont prélevées puis séchées à l'étuve à 70°C durant 48 heures. Les limbes et pétioles constituent deux sous-échantillons qui sont analysés séparément. Les teneurs en anions (N, P, S, Cl) sont déterminées sur les limbes et les teneurs en cations (K, Ca, Mg et Na) sont déterminées sur les pétioles. Les fonctions de production en azote F(N), en phosphore F(P), en potassium F(K) et en soufre F(S) sont calculées à partir des formules de type $F(X) = f(N, P, K, S, p, F)$ (1), proposées par Braud (1972) dans laquelle F(X) est le rendement que donne une fumure complète dont on a soustrait l'élément X, exprimé en pourcent de celui obtenu avec une fumure complète. N, P, K et S exprimés en %, représentent la teneur de ces éléments dans la matière sèche ; p, exprimé en g, est le poids sec de 30 feuilles séchées à 70°C à l'étuve et où F est le niveau de floraison des plants au 70^e jour après les semis. La nutrition est alors estimée optimale pour un élément, si la fonction de production est supérieure à 100, bonne, si elle est

comprise entre 90 et 100, déficiente, si elle est comprise entre 80 et 90 et, carencée, si la fonction de production est inférieure à 80.

Sur le maïs, les prélèvements foliaires ont été réalisés à 60 et 80 jours après les semis selon la méthode de diagnostic foliaire décrite par Loué (1984). Le tiers central des feuilles est retenu pour la détermination des teneurs en azote, phosphore et potassium. La déficience du maïs est indiquée pour des teneurs en N, P et K, respectivement, inférieures à 2,75%, 0,24% et 1,70%. La nutrition du maïs est bonne pour des teneurs en N se situant entre 2,76 et 3,5%, des teneurs en P comprises entre 0,25 et 0,40% et des teneurs en K supérieures à 2,25%.

Sur le sorgho, les prélèvements foliaires ont été réalisés uniquement à 60 jours après les semis, selon méthode de diagnostic foliaire décrite par Jacquinet (1984). Les teneurs en azote, phosphore, potassium et soufre sont déterminées dans les feuilles prélevées.

3.3.2.3.3. Evaluation des rendements sur les sites d'étude

Les rendements en coton graine, maïs grain et sorgho grain ont été déterminés par la récolte des parcelles utiles (128 m²) comportant 8 lignes de 20 m en station de recherche. Pour le cotonnier et le maïs en milieu paysan, les rendements ont été déterminés à partir de trois carrés de rendement de 64 m² chacun, implantés dans chaque parcelle élémentaire affectée à un traitement.

3.3.2.3.4. Bilans culturaux en station de recherche

En troisième année d'expérimentation sur le site de Farako-bâ, des bilans culturaux ont été établis. Ces bilans ont été calculés à partir des éléments minéraux (N, P, K et S) apportés par les fumures et ceux exportés par les cultures. Les rendements et les productions de matière sèche ont été utilisés pour évaluer les exportations minérales des cultures.

3.3.2.3.5. Activité microbienne du sol

L'activité respiratoire du sol a été évaluée au laboratoire, sur des échantillons de sol prélevés sur la station de Farako-bâ, sur l'horizon 0-20 cm à trois périodes différentes, à savoir : 1, 50 et 120 jours après l'apport des amendements en 2004.

En milieu paysan, l'activité respiratoire et la biomasse microbienne ont été déterminées sur les sols des trois sites (Boni, Dohoun et Balla), prélevés sur l'horizon 0-20 cm, après la récolte du maïs en 2007.

3.3.3. Etude de l'effet de la gestion des résidus de récolte sur l'acidification du sol dans un système de rotation coton-maïs-sorgho

Dans un système de rotation triennale coton-maïs-sorgho, l'incidence du recyclage des résidus de récolte est évaluée pour lutter contre l'acidification des sols à long terme. Les expérimentations sont conduites sur la ferme expérimentale SOFITEX de Boni, pendant 25 années (1982 à 2006), à travers un dispositif d'essai de longue durée.

3.3.3.1. Historique de l'étude

Ce dispositif a été implanté depuis 1981, sur un sol ferrugineux et évalue deux systèmes de gestion des résidus de récolte qui sont : i) le système de gestion traditionnelle des résidus de coton, de maïs et de sorgho par leur broyage et pâturage au champ et ii) le système de gestion des tiges de sorgho et de maïs par leur transformation en fumier, dans une fosse fumière, avec des arrosages, après un broyage et enrichissement à l'étable. L'étude proprement dite a démarré en 1982, sur un sol qui était exploité depuis 12 années, dans une rotation coton-sorgho-arachide. Une fumure minérale de 44 N – 35 P₂O₅ – 26 K₂O – 9 S - 1,5 B₂O₃, composée d'engrais coton 14-23-14-6S-1B, de chlorure de potasse (KCl 60% de K₂O) et d'urée, a été apportée de façon uniforme sur les cultures jusqu'en 1981. Une fumure de fond de 500 kg ha⁻¹ de Burkina phosphate a été apportée durant trois années, de 1982 à 1984, afin de prendre le relais des fumures phosphatées. Un complément annuel en N, P, K, S et B est apporté sous forme d'urée, de sulfate de potasse ou de chlorure de potasse, avec un appoint de boracine.

Un chaulage a été réalisé en 1989 à la dose de 1 t ha⁻¹ par un apport de chaux éteinte contenant 53% de CaO et 35% MgO (Nyangezi, 1989). En 1995, un sous-solage a été réalisé avec un tracteur de 120 CV dans le but de réduire l'érosion hydrique en effectuant un labour profond de 30 à 35 cm. Toutes les opérations de labour sont assurées habituellement par un tracteur Bouyer de puissance intermédiaire de 28 CV.

3.3.3.2. Dispositif expérimental

L'étude est réalisée en grandeur nature sur six hectares subdivisés en 12 blocs de 5000 m², cultivés selon une rotation triennale coton-maïs-sorgho. Dans un dispositif expérimental en blocs simples non randomisés, trois traitements sont comparés.

3.3.3.2.1. Modes de gestion des résidus de récolte

Les traitements correspondent aux trois modes de gestion des résidus de récolte combinés à des apports de phosphate naturel et d'engrais minéraux ainsi définis :

T1 – Gestion extensive des résidus de récolte (témoin sans aucune restitution).

Les tiges de maïs et de sorgho (*Sorghum bicolor* L.) sont pâturées ou exportées de la parcelle. Le phosphate naturel est appliqué à la dose de 300 kg ha⁻¹, à la volée, au moment du hersage, tous les trois ans sur le maïs (*Zea mays* L.). Ce traitement correspond à la pratique la plus proche de celle des paysans qui est la gestion traditionnelle ou extensive des résidus de récolte.

T2 - Gestion semi-intensive des résidus.

Les tiges de maïs sont directement enfouies au sol par un labour de fin d'hivernage, tandis que les tiges de sorgho sont recyclées en compost. En saison sèche, les 4 tonnes de tiges de sorgho récoltées en moyenne par hectare sont progressivement introduites dans le parc où elles sont piétinées et enrichies par les déjections animales. Un apport de 300 kg de phosphate naturel est effectué au cours de cette opération de broyage et d'enrichissement des tiges, assurée par environ 20 têtes de bovins, durant 45 jours de parcage. Les tiges sont ensuite retirées du parc puis soumises à des arrosages et retournements au cours d'un compostage en tas qui dure 60 jours. Cela permet ainsi de produire, cinq mois après la récolte du sorgho, 6 tonnes de compost. Ce compost est appliqué sur le maïs, à raison de 6 t ha⁻¹ tous les trois ans.

T3 - Gestion intensive des résidus de récolte.

Les tiges de maïs sont directement enfouies au sol par un labour de fin d'hivernage. Les quatre tonnes de tiges de sorgho produites à l'hectare sont recyclées en fumier par la technique du parc d'hivernage décrite par Berger *et al.* (1987) et Berger (1996). Les tiges de sorgho sont piétinées et enrichies par les déjections durant 45 à 60 jours de parcage d'un cheptel comptant en moyenne 20 bœufs. Les tiges séjournent dans le parc durant l'hivernage et se décomposent sous l'action des eaux de pluie. Cette technique permet d'obtenir, 18 mois après la récolte du sorgho, une quantité de 6 tonnes de fumier de parc. Le phosphate naturel est appliqué à la dose de 300 kg ha⁻¹ à l'épandage du fumier, qui est apporté sur le maïs à la dose de 6 t ha⁻¹, tous les trois ans.

Dans les trois systèmes de gestion des résidus, les tiges de cotonniers (*Gossypium hirsutum* L.) sont coupées et brûlées en petits tas.

3.3.3.2. Fertilisation des cultures

Sur l'ensemble des traitements, quel que soit le mode de gestion des résidus de récolte, le cotonnier est fertilisé chaque année par 50 kg ha⁻¹ d'urée, 100 kg ha⁻¹ de sulfate de potassium et 4 kg ha⁻¹ de boracine, appliqués à la levée, et par un complément de 50 kg ha⁻¹ d'urée à 40 jours après le semis. Le sorgho reçoit chaque année, 100 kg ha⁻¹ d'urée, à 40 jours après le semis (Tableau V).

Tableau V. Engrais minéraux appliqués sur le cotonnier et sur le sorgho

Coton: 100 kg ha⁻¹ d'urée + 100 kg ha⁻¹ de K₂SO₄ + 4 kg ha⁻¹ boracine

Sorgho : 100 kg ha⁻¹ d'urée

Sur les traitements en gestion extensive et en gestion intensive des résidus de récolte, le maïs reçoit annuellement, à la levée, 80 kg ha⁻¹ d'urée et 100 kg ha⁻¹ de chlorure de potassium (60% K₂O), ainsi que tous les trois ans, 300 kg ha⁻¹ de Burkina phosphate au hersage (Tableau VI). Le phosphate naturel (300 kg) est directement incorporé lors du compostage des résidus en gestion semi-intensive.

La fertilisation minérale (engrais solubles et phosphate naturel) ramenée à l'année, apporte par hectare 46 N, 25 P, 48 K, 18 S et 1 B sur le cotonnier, 74 N, 25 P, 60 K sur le maïs, 46 N et 25 P sur le sorgho.

Tableau VI. Fertilisation appliquée sur le maïs selon les modes de gestion des résidus

T1 – Gestion extensive des résidus

160 kg ha⁻¹ d'urée + 100 kg ha⁻¹ de KCl + 300 kg ha⁻¹ de BP à l'hersage tous les 3 ans

T2 – Gestion semi-intensive des résidus

160 kg ha⁻¹ d'urée + 100 kg ha⁻¹ de KCl + 300 kg de BP au compostage tous les 3 ans + 6 t ha⁻¹ de compost tous les 3 ans

T1 – Gestion intensive des résidus

160 kg ha⁻¹ d'urée + 100 kg ha⁻¹ de KCl + 300 kg ha⁻¹ de BP à l'hersage tous les 3 ans + 6 t ha⁻¹ de fumier tous les 3 ans

3.3.3.3. Conduite des travaux

Les opérations culturales ont été principalement réalisées par des équipements de motorisation intermédiaire, composés d'un tracteur Bouyer de 28 CV et de ses accessoires. La préparation du sol au tracteur débute chaque année à partir du mois de mai. Les parcelles sont labourées à la charrue à soc, à une profondeur d'environ 25 cm, puis hersées avant de mettre en place le coton, suivi du maïs et du sorgho. Les semis sont effectués dans la période allant

du 20 mai au 10 juillet, aux écartements de 75 cm entre les lignes. Le coton est semé manuellement alors que le maïs et le sorgho sont semés au tracteur. Un démariage est pratiqué à 15 jours après la levée pour maintenir 2 plants par poquet, pour le cotonnier et le maïs, et 3 plants par poquet pour le sorgho, afin de ramener les trois cultures à une densité théorique minimale de 62500 plants ha⁻¹.

La lutte contre les mauvaises herbes est réalisée par des applications d'herbicides de prélevée adaptés à chacune des trois cultures, ainsi que par des désherbages manuels et mécaniques. Les herbicides utilisés sur le cotonnier sont des associations de substances actives (métolachlor + dipropétryne) à 480 + 720 g ha⁻¹, (métolachlor + terbutryne) à 999 + 501 g ha⁻¹ et (Fluométuron + prométryne) à 750 + 750 g ha⁻¹. Sur maïs, des associations (alachlore + atrazine), (atrazine + métolachlor) et (aclonifène + atrazine) ont été utilisées à 750 + 750 g ha⁻¹ et l'atrazine à 1500 g ha⁻¹. Sur le sorgho, les substances actives (terbutryne + terbutylazine) à 750 + 750 g ha⁻¹ ont été utilisées pour le désherbage chimique.

Le buttage des cultures est réalisé avec le tracteur Bouyer de 28 CV. La protection phytosanitaire du cotonnier est assurée par l'application des insecticides vulgarisés en culture cotonnière.

3.3.3.4. Paramètres mesurés

3.3.3.4.1. Caractéristiques chimiques des sols

Les échantillons de sol sont prélevés sur les parcelles cultivées en coton pour suivre l'évolution des caractéristiques des sols sous les trois modes de gestion des résidus. Dans chaque bloc de 5000 m², on effectue, à l'aide de la tarière, 12 sondages sur 0-20 cm pour constituer un échantillon composite. Les échantillons de sol ainsi prélevés sont séchés à l'air puis tamisés à 2 mm pour les analyses. Les principaux paramètres analysés sont le carbone, l'azote, le phosphore (total et assimilable), les bases échangeables, la CEC et le pH eau. Les analyses de sols et de végétaux ont été effectuées de 1982 à 1990 au laboratoire du Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), à Montpellier (France), puis au laboratoire du Bureau National des Sols (BUNASOLS) du Burkina Faso, à partir 1991. Depuis 1999, les analyses sont réalisées de façon simultanée et/ou alternée par le laboratoire du BUNASOLS et par celui du Département Gestion des Ressources Naturelles et Systèmes de Production (GRN/SP) de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) du Burkina Faso.

3.3.3.4.2. Suivi de la nutrition minérale des cotonniers

Des prélèvements foliaires sont effectués chaque année sur les cotonniers au 70^e jour après le semis, selon la méthode du diagnostic foliaire de l'IRCT (Braud, 1984), précédemment décrite. Les teneurs en anions (N, P, S, Cl) et en cations (K, Ca, Mg et Na) ainsi que les fonctions de production en azote F(N), en phosphore F(P), en potassium F(K) et en soufre F(S) ont été déterminées durant 17 années d'exploitation continue des terres, de 1982 à 1998.

3.3.3.4.3. Rendements des cultures

La production de chaque traitement est récoltée manuellement puis pesée, pour déterminer les rendements en coton graine, maïs grain et sorgho grain. Le maïs est égrené par une égreneuse mécanique alors que les épis de sorgho sont soumis à un battage manuel. Pour ces trois cultures, les rendements déterminés chaque année servent à calculer, tous les 3 ans, un rendement moyen par cycle de rotation.

3.3.3.4.4. Bilan cultural

Un bilan cultural a été établi sur une période de 25 ans (1982 à 2006). Ce bilan est basé sur la différence entre les apports d'éléments minéraux par les fumures et les exportations minérales de la parcelle par les récoltes (Traoré, 1995 ; Koulibaly *et al.*, 2009a). Les exportations se composent de la récolte (coton graine, maïs grain et sorgho grain) et de 75% des résidus de récolte, qui sont supposés réellement exportés en gestion extensive des résidus. Dans ce cas, on considère que 25% des résidus de récolte constitués par les débris végétaux restant au sol après le pâturage et les cendres après les brûlis des tiges, ne sont pas exportés. En gestion semi-intensive et intensive des résidus de récolte, les exportations minérales par les résidus de récolte concernent surtout les tiges de cotonniers, celles de maïs étant restituées par enfouissement direct au sol, tandis que les tiges de sorgho sont recyclées en compost et en fumier.

3.3.4. Méthodes des analyses de laboratoire

Les analyses de sols et de végétaux ont été réalisées dans les laboratoires du Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) à Montpellier (France), du Bureau National des Sols (BUNASOLS) et du Département Gestion des Ressources Naturelles et Systèmes de Production (GRN/SP) de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA).

3.3.4.1. Analyses physico-chimiques des sols

• Granulométrie

Pour l'analyse granulométrique du sol à 3 ou 5 fractions, la méthode à la Pipette de Robinson Köln a été utilisée. La granulométrie est mesurée après oxydation de la matière organique avec de l'eau oxygénée, suivie d'une dispersion avec une solution de phosphate de sodium (NaPO_3)₆ (Van Reeuwijk, 1993).

• pH du sol

Le pH eau et le pH KCl du sol ont été mesurés par lecture directe au pH-mètre à électrode en verre, selon un rapport sol/solution de 1/2,5. L'eau et le KCl 1 M sont utilisés après un temps d'équilibre de 4 heures (McLean, 1982). L'acidité d'échange a été extraite par une solution de KCl 1M et titrée avec du NaOH (Houba *et al.*, 1995).

• Carbone organique

Le carbone organique est déterminé par la méthode Walkley et Black (1934). L'oxydation du carbone organique par le bichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), en présence d'acide sulfurique, est suivie d'un dosage colorimétrique de Cr_3^+ .

• Azote total

L'azote total est déterminé par minéralisation de Kjeldahl suivie d'un dosage de l'azote (NH_4^+) par la méthode au réactif de Nessler.

• Phosphore

Le phosphore assimilable des sols a été extrait par une solution de fluorure d'ammonium et d'acide chlorhydrique selon la méthode Bray I.

L'extraction du phosphore total se fait par une attaque perchlorique à chaud de 1 gramme de sol broyé. Le dosage est effectué par colorimétrie en présence de vanado-molybdate. La mesure de l'extinction est faite à 430 nm.

• Bases échangeables

Les cations échangeables sont déplacés du complexe adsorbant 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 Na^+ et K^+ en émission de flamme.

• Capacité d'échange 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^+ , Na^+) ainsi que l'hydrogène et l'aluminium échangeable.

3.3.4.2. Analyses biologiques des sols

Les analyses biologiques ont été réalisées au laboratoire de microbiologie du Département Productions Forestières de l'Institut de l'Environnement et Recherches agricoles (INERA) du Burkina Faso.

• Tests de respirométrie

Le carbone organique a été mesuré selon la méthode proposée par Chaussod et Nicolardot (1982). Les échantillons de sols sont séchés à l'ombre, à température ambiante, puis tamisés à 2 mm. On introduit 100 g de sol humidifié au 2/3 de sa capacité de rétention dans un bocal en verre d'un litre, hermétiquement fermé. Un bécher contenant 20 ml de NaOH 0,1 N et un récipient contenant de l'eau distillée sont placés dans le bocal, qui est mis à incuber à 29°C. Le CO₂ dégagé est piégé par la soude et dosé par titration, avec du HCl 0,1 N en présence de la phénophtaléine, après précipitation préalable du carbonate de sodium par 2 ml de BaCl₂ à 3%. L'expérience d'incubation a été conduite pendant 21 jours. Le dégagement de CO₂ a été mesuré chaque jour, durant la première semaine, puis tous les deux jours, à partir de la deuxième semaine d'incubation. La quantité (Q) de CO₂ dégagé et, partant, de carbone minéralisé, est donnée par la formule suivante (Dommergues, 1968) :

$$Q \text{ (mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ sol)} = (V_1 - V_2) \times 2,2 \text{ (2)} :$$

V₁ = volume moyen de HCl N/10 pour le témoin (Blanc)

V₂ = volume moyen de HCl N/10 pour le traitement

Le coefficient 2,2 a été utilisé car 2,2 g de CO₂ correspondent à 1 ml de HCl N/10 (Dommergues, 1968).

• Détermination de la biomasse microbienne

La biomasse microbienne totale des sols a été mesurée selon la méthode de fumigation-extraction proposée par Jenkinson et Powlson (1976) et adaptée par Chaussod et Nicolardot (1982) selon la formule :

$$B = [F(0-7) - F(7-14)] Kc^{-1} \text{ (3)}$$

B est la biomasse microbienne (exprimé en mg C 100 g⁻¹ de sol),

F(0-7) représente le carbone (mg kg⁻¹) du CO₂ dégagé par l'échantillon fumigé entre 0 et 7 jours d'incubation;

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 le coefficient de proportionnalité représentant la fraction de carbone minéralisable du compartiment « biomasse microbienne ». Il dépend du type de sol, mais nous avons considéré sa valeur moyenne égale à 0,41.

3.3.4.3. Analyses de végétaux

Le phosphore total, l'azote total et le potassium des végétaux ont été extraits par digestion dans un complexe d'acide sulfurique, d'acide salicylique, d'eau oxygénée et de sélénium.

Le phosphore total des végétaux a été ensuite dosé par colorimétrie, selon la méthode du molybdo-phosphate réduit à l'acide ascorbique. Le potassium a été dosé par spectrophotométrie à émission de flamme (Bunasols, 1987). La détermination de l'azote est effectuée par la méthode micro-KJELDAHL, basée sur le même principe que la méthode KJELDAHL pour l'azote total du sol. La minéralisation est suivie du dosage effectué par l'acide sulfurique (H_2SO_4 0,01 N).

L'échantillon de plante broyé est minéralisé par attaque de nitro-perchlorique, en présence d'acide hydrochlorique ($HClO_4$) concentré pour extraire les différents éléments. Le temps de minéralisation est plus long pour le dosage du soufre effectué par néphélométrie. Pour Ca et Mg, le dosage est effectué par électrophotométrie par absorption atomique, tandis que Na est dosé par photométrie de flamme.

3.3.5. Traitement statistique des données

Les logiciels STATITCF et XLSTAT 2007 ont été utilisés pour l'analyse de variance (ANOVA) des données.

Dans l'étude de longue durée, de l'effet de la gestion des résidus de récolte sur l'acidification du sol, les teneurs en éléments minéraux des cotonniers à 70 jours après les semis (N, P, K, S, Ca, Mg, Cl, B) sont regroupées tous les trois ans, puis analysées pour déterminer des valeurs moyennes de ces teneurs par cycle de rotation. Le rendement obtenu dans l'année pour une culture représente une répétition dans l'ANOVA. Les rendements moyens sont calculés sur une durée de 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, et 25 années d'exploitation continue, correspondant, respectivement, à 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8 cycles de rotation.

Le test de Fisher a été utilisé pour la séparation des moyennes lorsque l'analyse de variance révèle des différences significatives entre les traitements, au seuil de probabilité de 5%.

TROISIEME PARTIE

RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 4. CARACTERISATION DE L'ACIDITE DE TROIS TYPES DE SOL EN ZONE COTONNIERE OUEST DU BURKINA FASO

L'acidification se traduit par une modification des caractéristiques physico-chimiques et biologiques du sol. Les modifications des propriétés du sol peuvent être liées simplement aux apports d'engrais ainsi qu'à d'autres facteurs et la seule variation du pH a de nombreuses conséquences dans le sol (Pernes-Debuyser et Tessier, 2002).

4.1. Description des caractéristiques morphologiques des sols

Sur les trois types de sol étudiés, une description morphologique principalement basée sur la couleur, la consistance et l'activité biologique du sol, a été faite à partir des profils pédologiques.

Dans les horizons supérieurs des sols bruns eutrophes (cambisols) du site de Boni, il a été observé, à l'état sec, les couleurs brun fort (10YR5/6) et brun jaunâtre (10YR5/4), respectivement, sur le sol sous jachère et sur le sol sous culture attelée (Tableau VII). Dans les sols bruns eutrophes (cambisols) cultivés ou sous jachère, les couleurs homogènes des profils, ne sont pas influencées par les modes d'exploitation des terres (Annexe 3). En revanche, le sol brun eutrophe (cambisols) sous jachère, présente une consistance très dure en surface et une consistance friable en profondeur qui diffère de la consistance dure, observée sur l'ensemble du profil du sol sous culture attelée. Dans ces sols, une activité biologique assez bien développée a été observée avec la présence de racines fines et peu nombreuses (Tableau VII).

Tableau VII. Morphologie des sols bruns eutrophes (cambisols) du site de Boni

Modes d'exploitation des terres	Profondeurs (cm)	Couleur à l'état sec	Consistance ⁽¹⁾	Activité biologique ⁽²⁾
Sol sous jachère	0-12	10YR5/6	+++	**
	12-30	10YR5/6	-	**
	30-60	10YR5/6	-	*
	60-120	10YR5/6	+	●
Sol sous culture attelée	0-16	10YR5/4	++	**
	16-40	7,5YR4/4	++	**
	40-75	10YR4/6	++	*
	75-120	2,5Y5/4	+	●

⁽¹⁾ +++ : Très dure, ++ : Dure, + : Peu dure, - : Friable.

⁽²⁾ ** : assez bien développée, * : moyennement développée, ● : faiblement développée

Du point de vue des caractéristiques morphologiques, les sols bruns eutrophes (cambisols) présentent des similitudes tant au niveau de la couleur, de la consistance que de l'activité biologique, indépendamment des modes d'exploitation des terres.

Dans les sols ferrugineux (lixisols) du site de Dohoun, l'examen des profils a révélé des variations de couleur et de consistance en rapport avec les modes d'exploitation des terres (Tableau VIII).

Tableau VIII. Morphologie des sols ferrugineux (lixisols) du site de Dohoun

Modes d'exploitation des terres	Profondeurs (cm)	Couleur à l'état sec	Consistance ⁽¹⁾	Activité biologique ⁽²⁾
Sol sous jachère	0-6	10YR5/3	+	***
	6-15	10YR5/4	-	**
	15-30	10YR7/4	+	**
	30-120	Cuirasse		
Sol sous culture attelée	0-6	10YR5/3	-	**
	6-23	10YR5/4	-	**
	23-39	10YR6/4	-	*
	39-90	Cuirasse		
	90-120	10YR6/4	+	**
Sol sous culture motorisée	0-8	10YR6/3	-	**
	8-30	10YR6/3	++	**
	30-48	10YR7/3	+	*
	48-80	10YR7/2	+	*
	80-120	10YR7/2	+	*

⁽¹⁾ +++ : Très dure, ++ Dure, + : Peu dure, - : Friable.

⁽²⁾ *** : Bien développée, ** : Assez bien développée, * : Moyennement développée

Les sols ferrugineux (lixisols) à l'état sec, sous la culture attelée et sous la jachère, sont de couleur brun (10YR5/3) et brun très pâle (10YR6/3), respectivement, en surface et en profondeur, sur 15-39 cm. Sous la culture motorisée, la couleur du sol est brun pâle (10YR6/3) en surface sur 0-6 cm, et brun très pâle (10YR7/3) en profondeur sur 15-30 cm (Annexe 4). Les sols cultivés (traction bovine et motorisée) sont de consistance friable tandis que le sol sous la jachère naturelle, présente une consistance dure. L'activité biologique, bien développée sous la jachère naturelle, est plus intense que dans les sols cultivés où elle s'est montrée assez bien développée avec de nombreuses racines fines dans l'horizon supérieur (Tableau VIII).

L'examen des horizons supérieurs des sols ferrallitiques (ferralsols) à l'état sec, montre d'importantes différences de couleur (Tableau IX). Ces sols, exploités en culture attelée et en culture motorisée, sont de couleur brun pâle (10YR6/3), contre une couleur gris brunâtre clair (10YR6/2), sous la jachère. En revanche, tous ces sols présentent en profondeur, une couleur uniforme, jaune rougeâtre (7,5YR6/6). En ce qui concerne la consistance, les sols cultivés sont apparus friables alors que le sol sous jachère présentait une consistance peu dure. Ces sols ferrallitiques (ferralsols) présentent une activité biologique assez bien à moyennement développée (Annexe 5).

Tableau IX. Morphologie des sols ferrallitiques (ferralsols) du site de Balla

Modes d'exploitation des terres	Profondeurs (cm)	Couleur à l'état sec	Consistance ⁽¹⁾	Activité biologique ⁽²⁾
Sol sous Jachère	0-6	10YR6/2	+	*
	6-28	10YR6/3	+	**
	28-40~50	7,5YR6/6	++	*
	40~50-68	7,5YR6/6	-	*
	68-130	7,5YR6/6	++	*
Sol sous culture attelée	0-10	10YR6/3	-	*
	10-24	10YR6/6	+	*
	24-55	7,5YR6/6	+	*
	55-90	7,5YR 6/6	++	●
Sol sous culture motorisée	0-15	10YR6/3	-	*
	15-30	10YR5/4	+	**
	30-50	7,5YR6/6	++	**
	50-80	7,5YR6/6	++	*
	80-120	7,5YR6/6	++	**

⁽¹⁾. +++ : Très dure, ++ : Dure, + : Peu dure, - : Friable.

⁽²⁾ ** : assez bien développée, * : moyennement développée, ● : faiblement développée

4.2. Effets des modes d'exploitation des terres sur la granulométrie et les réserves en éléments totaux des sols

4.2.1. Composition granulométrique et acidification des sols

Les sols bruns eutrophes (cambisols) ont une texture limono-argileuse et renferment des teneurs en argile (329 à 375 g kg⁻¹) plus élevées que celles des sols ferrugineux (lixisols) et des sols ferrallitiques (ferralsols), quel que soit le mode d'exploitation des terres (Tableau X). La culture attelée n'a pas influencé la granulométrie des sols bruns eutrophes (cambisols) surtout les teneurs en argile dont les charges électriques permanentes et variables contrôlent

l'acidité du sol. Les limons atteignent 387 g kg⁻¹ alors que les taux de sable ne dépassent pas 342 g kg⁻¹ dans ces sols.

Tableau X. Granulométrie des sols bruns eutrophes (cambisols), ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols) (2007)

Types de sol	Modes d'exploitation des terres	Profondeurs	Argile	Limons	Sables	
		cm	g kg ⁻¹			
Brun eutrophe (cambisol)	Sol sous jachère	0-12	329	329	342	
		12-30	375	297	328	
Boni	Sol sous culture attelée	0-16	348	387	265	
		16-40	370	347	283	
Ferrugineux (lixisol)	Sol sous jachère	0-6	153	271	576	
		6-15	153	306	541	
		15-30	188	247	565	
	Dohoun	Sol sous culture attelée	0-6	141	282	577
			6-23	165	294	541
			23-39	188	282	529
Sol sous culture motorisée	0-8	59	282	659		
	8-15	194	387	419		
	Ferrallitique (ferralsol)	Sol sous jachère	0-6	59	112	829
6-28			232	116	652	
28-40			177	94	729	
Balla		Sol sous culture attelée	0-10	194	135	671
			10-24	290	155	555
			24-55	445	194	361
Sol sous culture motorisée	0-15	70	118	812		
	15-30	168	111	721		

Les valeurs présentées dans le tableau sont issues de chacun des profils pédologiques des trois types de sol.

Dans les sols ferrugineux (lixisols) à texture limono-sableuse, les teneurs en argile, qui sont comprises entre 59 et 194 g kg⁻¹, ont été fortement affectées par la culture motorisée (Tableau X). Par rapport au sol sous jachère et au sol sous culture attelée, la culture motorisée a entraîné une baisse de la teneur en argile de 58% et un accroissement de la teneur en sable de 14% en surface, sur 0-8 cm. Les fractions granulométriques les plus importantes sont celles des sables abondants en surface, avec des valeurs variant de 419 à 658 g kg⁻¹, et celles des limons comprises entre 247 et 387 g kg⁻¹.

Dans les sols ferrallitiques (ferralsols) qui ont une texture sablo-limoneuse en surface et limono-sableuse en profondeur, les teneurs en argile sont faibles, comme celles des sols ferrugineux (lixisols) (Tableau X). Dans les sols ferrallitiques (ferralsols) et sur la profondeur

0-15 cm, sous la culture motorisée, la teneur en argile a baissé de 64%, tandis que la teneur en sable a augmenté de 21%, par rapport à la culture attelée.

Dans les sols ferrugineux (lixisols) et les sols ferrallitiques (ferralsols), la culture motorisée entraîne, au niveau des horizons superficiels, des pertes d'argiles dont la fraction fine assure, pour l'essentiel, la régulation des phénomènes physico-chimiques qui contrôlent l'acidification du sol.

4.2.2. Effet de l'exploitation des terres sur les réserves en éléments totaux et l'acidification du sol

La garniture cationique du complexe adsorbant repose sur les réserves en éléments minéraux du sol, qui influencent la solution du sol et la mobilité des cations, qui à leur tour, conditionnent l'acidification.

4.2.2.1. Phosphore et potassium totaux

Les teneurs en phosphore et en potassium des sols sont présentées dans le tableau XI.

Tableau XI. Teneurs en phosphore et en potassium des sols

Types de sol	Modes d'exploitation des terres	Profondeurs cm	mg kg ⁻¹			
			P total	P ass ¹ (Bray 1)	K total	K disp ²
Brun eutrophe (cambisol) Boni	Sol sous jachère	0-12	151	0,54	625	70
		12-30	100	0,72	626	56
	Sol sous culture attelée	0-16	120	0,90	309	71
		16-40	161	0,36	436	76
Ferrugineux (lixisol) Dohoun	Sol sous jachère	0-6	181	3,49	1115	49
		6-15	201	2,33	1129	43
		15-30	151	2,77	1287	49
	Sol sous culture attelée	0-6	281	9,22	1156	106
		6-23	161	2,86	1063	43
		23-39	181	2,24	1284	45
	Sol sous culture motorisée	0-8	111	6,89	539	32
		8-15	80	2,42	690	35
Ferrallitique (ferralsol) Balla	Sol sous jachère	0-6	60	2,15	199	26
		6-28	60	3,94	187	17
		28-40	80	1,88	431	29
	Sol sous culture attelée	0-10	60	5,37	192	38
		10-24	100	4,57	426	33
		24-55	120	1,16	734	29
	Sol sous culture motorisée	0-15	111	11,64	362	43
		15-30	100	1,97	463	28

P ass¹ = phosphore assimilable, K disp² = potassium disponible. Les valeurs présentées dans le tableau sont issues de chacun des profils pédologiques des trois types de sol.

Il ressort que ces sols sont pauvres en phosphore, avec des teneurs en P total qui varient de 100 à 161 mg P kg⁻¹ dans les sols bruns eutrophes (cambisols) contre 80 à 281 mg P kg⁻¹ dans les sols ferrugineux (lixisols) et seulement 60 à 120 mg P kg⁻¹ dans les sols ferrallitiques (ferralsols) (Tableau XI). L'exploitation des terres sous culture motorisée entraîne des teneurs en P total plus faibles que celles observées sous la culture attelée. Le P assimilable, qui ne dépasse pas 11,64 mg P kg⁻¹ est faible, voire marginal, avec des teneurs qui, contrairement au P total, sont plus importantes dans les sols cultivés que dans les sols sous la jachère. Le P assimilable semble dépendre davantage de la mise en culture et de la nature du sol que de sa teneur en P total.

Ces sols sont pauvres en potassium, avec des teneurs en K total dans les sols ferrugineux (lixisols) (539 à 1284 mg kg⁻¹), qui sont 2 à 3 fois plus importantes que celles des sols bruns eutrophes (cambisols) (309 à 626 mg kg⁻¹) et des sols ferrallitiques (ferralsols) (187 à 734 mg kg⁻¹) (Tableau XI). Par rapport à la culture attelée, l'exploitation des terres en culture motorisée a entraîné une baisse de la teneur en K total de 52%, notée uniquement sur les sols ferrugineux (lixisols). Les teneurs en K disponible dans ces sols étaient très faibles, soit, respectivement, 56 à 76 mg kg⁻¹, 43 à 106 mg kg⁻¹ et 17 à 43 mg kg⁻¹ dans les sols bruns eutrophes (cambisols), ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols). De façon générale, les teneurs en K disponible étaient plus élevées dans les sols cultivés que dans les sols sous jachère, à l'exception du sol ferrugineux (lixisol) sous culture motorisée, dans lequel une baisse importante de la teneur en K disponible a été notée (Tableau XI). Par rapport à la jachère, il ressort que l'exploitation des terres affecte les teneurs en P total et en K total, dont les baisses plus importantes sous la culture motorisée, exposent ces sols à l'acidification.

4.2.2.2. Calcium et magnésium totaux

Les teneurs en calcium et magnésium des sols sont présentées en annexe 6 et résumées par les figures 7, 8 et 9. Les teneurs en Ca total et en Ca disponible des sols bruns eutrophes (cambisols) dépassent largement celles des sols ferrugineux (lixisols) et des sols ferrallitiques (ferralsols) qui sont très faibles. Sur les sols ferrugineux (lixisols), la culture motorisée entraîne une très forte diminution de la teneur en Ca total, qui passe de 3521 mg kg⁻¹ sous la culture attelée à 357 mg kg⁻¹, soit une chute de 90% pouvant influencer le pH de ces sols. La tendance évolutive des teneurs en Mg total et en Mg disponible est similaire à celle du Ca sur l'ensemble de ces trois types de sol. Les réserves en Ca et Mg dépendent beaucoup de la nature du sol et sont très hétérogènes, avec des teneurs 2 à 20 fois plus élevées dans les sols bruns eutrophes (cambisols) que dans les sols ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols).

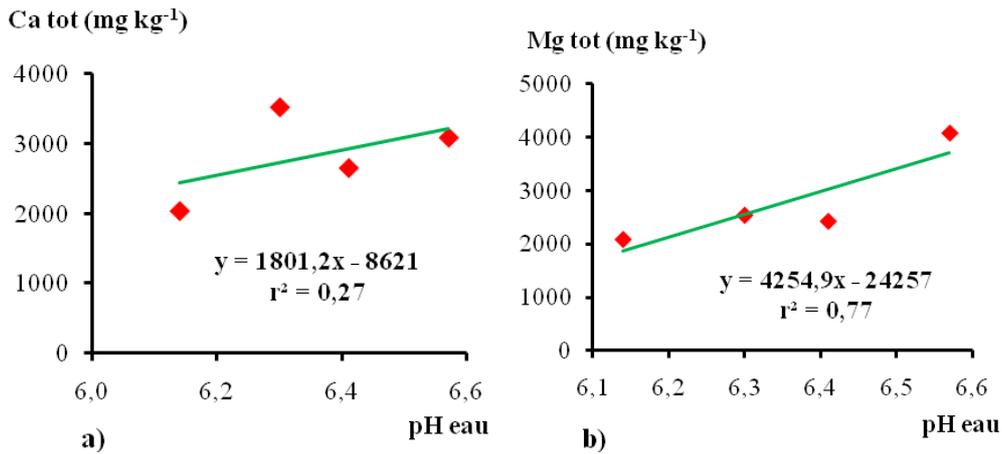


Figure 7. Corrélations entre le calcium total et le pH eau (a) et entre le magnésium total et le pH eau (b) sur les sols bruns eutrophes (cambisols)

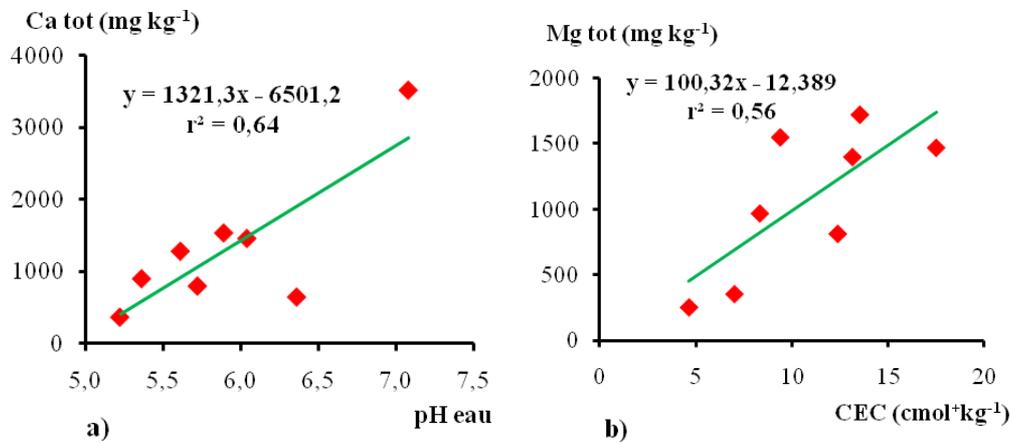


Figure 8. Corrélation entre le calcium total et le pH eau (a) et entre le magnésium total et la CEC (b) sur les sols ferrugineux (lixisols)

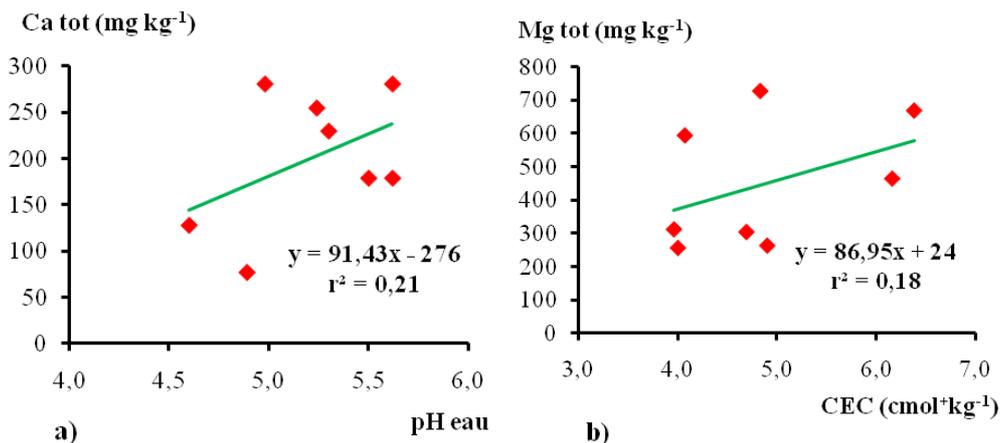


Figure 9. Corrélation entre le calcium total et le pH eau (a) et entre le magnésium total et la CEC (b) sur les sols ferrallitiques (ferralsols)

Les figures 7, 8 et 9 montrent que la corrélation entre le pH eau et le Ca total est positive et forte dans les sols ferrugineux (lixisols) ($r^2 = 0,64$) mais, faible sur les sols bruns eutrophes (cambisols) ($r^2 = 0,27$) et sur les sols ferrallitiques (ferralsols) ($r^2 = 0,21$). Ces figures indiquent que le Mg total est en corrélation positive forte avec le pH eau ($r^2 = 0,77$) sur les sols bruns eutrophes (cambisols). Le Mg total est en corrélation positive faible avec la CEC sur les sols ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols).

4.2.2.3. Fer et manganèse totaux

Les sols bruns eutrophes (cambisols) se caractérisent par des teneurs en fer et en manganèse plus élevées que celles des sols ferrugineux (lixisols) et des sols ferrallitiques (ferralsols) (Tableau XII).

Tableau XII. Teneurs en fer et en manganèse des sols

Types de sol	Modes d'exploitation des terres	Profondeurs	Fe total	Fe libre	Mn total
		cm	mg kg ⁻¹		
Brun eutrophe (cambisol) (Boni)	Sol sous jachère	0-12	7610	2630	1123
		12-30	6510	3170	667
	Sol sous culture attelée	0-16	5090	3180	1171
		16-40	8710	3840	961
Ferrugineux (lixisol) (Dohoun)	Sol sous jachère	0-6	2050	1620	176
		6-15	3290	1650	313
		15-30	2260	1730	153
	Sol sous culture attelée	0-6	2630	1520	316
		6-23	2720	1660	333
		23-39	3410	2090	427
	Sol sous culture motorisée	0-8	590	380	59
		8-15	650	440	53
Ferrallitique (ferralsol) (Ballà)	Sol sous jachère	0-6	460	300	62
		6-28	470	340	40
		28-40	850	690	54
	Sol sous culture attelée	0-10	480	340	70
		10-24	900	550	151
		24-55	1300	1090	137
	Sol sous culture motorisée	0-15	730	540	79
		15-30	930	740	254

Les valeurs présentées dans le tableau sont issues de chacun des profils pédologiques des trois types de sol.

Par rapport à la jachère, l'exploitation des terres semble enrichir les sols bruns eutrophes (cambisols) en fer libre (3180 à 3840 mg kg⁻¹) et en manganèse (961 à 1171 mg kg⁻¹) dont les

teneurs diminuent en profondeur (16-40 cm). La baisse du pH favorise la solubilité du fer et du manganèse et peut provoquer des toxicités sur les cultures.

Dans des sols ferrugineux (lixisols), les teneurs en Fe total, qui étaient respectivement, de 2050 et de 2630 mg kg⁻¹ sous la jachère et sous culture attelée, ont baissé de façon spectaculaire, sous culture motorisée (590 mg kg⁻¹). Comme le Fe total, les teneurs en Fe libre et en manganèse étaient aussi très faibles pour les sols sous culture motorisée. Dans les sols ferrallitiques (ferralsols) les teneurs en fer et en manganèse étaient très faibles et peu influencées par l'exploitation des terres (Tableau XII).

La comparaison entre les types de sol montre que les réserves en fer et en manganèse, varient selon la nature du sol et ne présentent pas pour l'instant des risques de toxicité consécutive à leur solubilisation à faible pH.

4.3. Diagnostic de l'acidification des sols par les effets de l'exploitation des terres

4.3.1. Relation entre l'évolution de quelques paramètres chimiques et l'acidification des sols

Dans le sol, les particules les plus fines, comme les matières organiques, les argiles et les oxydes, ont la particularité de développer une grande surface spécifique et de posséder une charge électrique superficielle importante qui contrôle l'acidité du sol.

• Sols bruns eutrophes (cambisols)

Les teneurs en carbone des sols bruns eutrophes (cambisols) qui varient de 3,3 à 7,9 g kg⁻¹ sont assez faibles (Tableau XIII).

Tableau XIII. Teneurs en carbone, en azote et rapport C/N des sols bruns eutrophes (cambisols)

Mode d'exploitation	C total (g kg ⁻¹)		N total (g kg ⁻¹)		C/N	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
Sol sous jachère	7,93 ^a	4,20 ^a	0,61 ^a	0,37 ^a	13,07 ^a	11,47 ^a
Sols sous culture attelée	5,47 ^a	3,30 ^b	0,45 ^a	0,30 ^b	12,18 ^a	11,13 ^a
Probabilité (5%)	0,123	0,036	0,152	0,049	0,078	0,532
Signification	ns	s	ns	s	ns	ns

Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. ns : non significatif, s : significatif. Chaque valeur dans le tableau représente la moyenne de 6 mesures.

Par rapport à la jachère, la culture attelée a entraîné une diminution des teneurs en carbone et en azote, qui est plus importante en profondeur sur 20-40 cm, où les teneurs de ces deux éléments baissent en moyenne de 31%. Les rapports C/N, qui se situent entre 11 et 13, diminuent en profondeur et ne sont pas influencés par la culture attelée, qui est plus acidifiante par rapport à la jachère (Tableau XIII).

• *Sols ferrugineux (lixisols)*

Dans les sols ferrugineux (lixisols), la culture motorisée conduit à une baisse significative des teneurs en carbone et en azote, qui chutent de moitié par rapport à la culture attelée (Tableau XIV). Dans ces sols, les teneurs en carbone et en azote diminuent respectivement, de 21 et 12% en profondeur sur 20-40 cm. Ces pertes de carbone et d'azote induites par la culture motorisée acidifient davantage le sol par rapport à la culture attelée où le carbone semble mieux préservé. Les rapports C/N de ces sols (11,4 à 13,3) sont statistiquement homogènes et indiquent une relative bonne, mais lente, minéralisation de la matière organique.

Tableau XIV. Teneurs en carbone, en azote total et rapport C/N des sols ferrugineux (lixisols)

Modes d'exploitation des terres	C total (g kg ⁻¹)		N total (g kg ⁻¹)		C/N	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
Sol sous jachère	10,17 ^{ab}	8,20 ^a	0,76 ^{ab}	0,66 ^a	13,3 ^a	12,3 ^a
Sol sous culture attelé	11,20 ^a	10,35 ^a	0,86 ^a	0,86 ^a	12,9 ^a	12,2 ^a
Sol sous culture motorisée	5,23 ^b	3,93 ^b	0,42 ^b	0,34 ^b	12,3 ^a	11,4 ^a
Probabilité (5%)	0,047	0,006	0,038	0,010	0,190	0,657
Signification	s	s	s	s	ns	ns

Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. ns : non significatif, s : significatif. Chaque valeur dans le tableau représente la moyenne de 6 mesures.

• *Sols ferrallitiques (ferralsols)*

Il ressort du tableau XV que la mise en culture des sols ferrallitiques (ferralsols), très pauvres en carbone et en azote n'a pas montré d'effets dépressifs par rapport à la jachère.

Tableau XV. Teneurs en carbone, en azote total et rapport C/N des sols ferrallitiques (ferralsols)

Modes d'exploitation des terres	C total (g kg ⁻¹)		N total (g kg ⁻¹)		C/N	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
Sol sous jachère	4,13 ^a	3,50 ^b	0,33 ^a	0,29 ^b	12,4 ^a	12,1 ^a
Sol sous culture attelée	3,83 ^a	4,23 ^{ab}	0,31 ^a	0,34 ^{ab}	12,5 ^a	12,4 ^a
Sol sous culture motorisée	4,97 ^a	4,83 ^a	0,39 ^a	0,40 ^a	12,5 ^a	12,2 ^a
Probabilité (5%)	0,320	0,049	0,181	0,025	0,987	0,850
Signification	ns	s	ns	s	ns	ns

Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. ns : non significatif, s : significatif. Chaque valeur dans le tableau représente la moyenne de 6 mesures.

L'exploitation des terres a un effet significatif, uniquement en profondeur (20-40 cm) où le taux de carbone est plus faible sous la jachère. Les rapports C/N de ces sols sont

constants tant en surface qu'en profondeur (Tableau XV). Par rapport à la jachère, les teneurs en carbone et en azote ne laissent entrevoir aucune tendance d'acidification de ces sols après leur mise en culture.

Le tableau XVI montre que les trois types de sol ont des teneurs en carbone significativement différentes ($p < 0,0001$). Les sols ferrugineux (lixisols), avec $12,5 \text{ g C kg}^{-1}$ de sol, sont plus riches en carbone que les sols bruns eutrophes (cambisols) qui sont significativement supérieurs aux teneurs en carbone des sols ferrallitiques (ferralsols). Les modes d'exploitation des terres n'influencent pas de façon significative les teneurs en carbone ($p = 0,156$) des trois types de sol. Par rapport à la jachère retenue comme situation de référence, quel que soit le sol, sa mise en culture entraîne une légère baisse du carbone, le rendant plus sensible à l'acidification.

Tableau XVI. Teneurs en carbone des sols sur 0-60 cm (g kg^{-1})

Modes d'exploitation des terres	Sol brun eutrophe (cambisol) Boni	Sol ferrugineux (lixisol) Dohoun	Sol ferrallitique (ferralsol) Balla
	C (g kg^{-1})		
Sol sous jachère	10,5	13,9	7,2
Sol sous culture attelée	10,4	11,9	6,7
Sol sous culture motorisée	-	11,7	7,6
Moyenne	10,5	12,5	7,2
Types de sol	< 0,0001		
Mode d'exploitation des terres	0,156		
Types de sol x Mode d'exploitation des terres	< 0,0001		

- : valeur non déterminée. Les valeurs présentées dans le tableau sont issues de chacun des profils pédologiques des trois types de sol.

4.3.2. Evolution des bases échangeables et de la saturation du complexe adsorbant

4.3.2.1. Bases échangeables des sols bruns eutrophes (cambisols)

Dans les sols bruns eutrophes (cambisols), les réserves en bases échangeables, notamment les teneurs en Ca^{2+} et en Mg^{2+} , sont significativement élevées avec l'exploitation des terres en culture attelée (Tableau XVII).

Les teneurs en K^+ et Na^+ sont statistiquement homogènes tandis que la somme des bases échangeables (SBE) est significativement supérieure dans les sols cultivés, où elle est 2 fois plus élevée que sous la jachère. De façon générale, quelle que soit l'exploitation des sols bruns eutrophes (cambisols), leurs teneurs en bases échangeables augmentent en profondeur sur 20-40 cm et ne révèlent aucune tendance à l'acidification par rapport à la jachère.

Tableau XVII. Bases échangeables et SBE des sols bruns eutrophes (cambisols) du site de Boni

Couches	Modes d'exploitation des terres	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SBE	Ca/Mg
		cmol ⁺ kg ⁻¹					
0-20 cm	Sol sous jachère	10,70 ^b	2,95 ^b	0,55 ^a	0,053 ^a	14,26 ^b	3,63
	Sol sous culture attelée	19,35 ^a	4,76 ^a	0,65 ^a	0,053 ^a	24,82 ^a	4,07
Probabilité (5%)		0,018	0,003	0,366	1,000	0,015	
20-40 cm	Sol sous jachère	11,64 ^b	2,72 ^b	0,53 ^a	0,06 ^a	14,94 ^b	4,28
	Sol sous culture attelée	22,33 ^a	4,19 ^a	0,58 ^a	0,05 ^a	27,15 ^a	5,33
Probabilité (5%)		0,021	0,018	0,631	0,374	0,015	

Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. Chaque valeur dans le tableau représente la moyenne de 6 mesures.

4.3.2.2. Bases échangeables des sols ferrugineux (lixisols)

L'exploitation des sols ferrugineux a influencé de façon significative les teneurs en Ca²⁺ et en Mg²⁺ ainsi que la SBE (Tableau XVIII).

Tableau XVIII. Bases échangeables des sols ferrugineux (lixisols) du site de Dohoun (cmol⁺kg⁻¹)

Couches	Modes d'exploitation des terres	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SBE	Ca/Mg
		cmol ⁺ kg ⁻¹					
0-20 cm	Sol sous jachère	4,59 ^b	1,13 ^{ab}	0,39 ^{ab}	0,043 ^a	6,16 ^b	4,06
	Sol sous culture attelée	7,45 ^a	1,45 ^a	0,66 ^a	0,050 ^a	9,61 ^a	5,14
	Sol sous culture motorisée	2,13 ^c	0,64 ^b	0,38 ^b	0,043 ^a	3,19 ^c	3,33
Probabilité (5%)		0,001	0,036	0,046	0,634	0,003	
20-40 cm	Sol sous jachère	3,55 ^b	0,86 ^a	0,38 ^a	0,043 ^a	4,83 ^b	4,13
	Sol sous culture attelée	6,63 ^a	1,41 ^a	0,52 ^a	0,050 ^a	8,61 ^a	4,70
	Sol sous culture motorisée	1,66 ^c	0,72 ^a	0,33 ^a	0,040 ^a	2,75 ^b	2,31
Probabilité (5%)		0,002	0,125	0,321	0,393	0,004	

Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. Chaque valeur dans le tableau représente la moyenne de 6 mesures.

Par rapport aux sols sous culture attelée, la jachère se révèle significativement plus pauvre en Ca²⁺ échangeable, alors que la culture motorisée entraîne les plus faibles réserves en Ca²⁺ et Mg²⁺. La somme des bases échangeables, qui se situe entre 2,75 et 3,19 cmol⁺ kg⁻¹ sur 0-20 cm et 20-40 cm en culture motorisée, était 2 à 3 fois plus faible qu'en culture attelée (Tableau XVIII). La SBE des sols sous jachère est aussi inférieure à celle des sols sous culture attelée. Les cations échangeables du complexe ainsi que la SBE diminuent en profondeur sur

20-40 cm. La classification des valeurs de la SBE par ordre décroissant est la suivante : sols sous culture attelée > sols sous jachère > sols sous culture motorisée (Tableau XVIII).

Les réserves en bases échangeables sont dans l'ensemble assez faibles, en particulier dans les sols sous la culture motorisée qui accentue les pertes de Ca^{2+} et de Mg^{2+} et se révèle de ce fait, être une pratique plus acidifiante que la culture attelée.

4.3.2.3. Bases échangeables des sols ferrallitiques (ferralsols)

Dans ces sols ferrallitiques (ferralsols), très pauvres en bases échangeables, les modes d'exploitation des terres ont eu un effet significatif seulement en profondeur, sur 20-40 cm (Tableau XIX).

Tableau XIX. Bases échangeables et SBE des sols ferrallitiques (ferralsols) du site de Balla

Couches	Modes d'exploitation des terres	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	SBE	Ca/Mg
		cmol ⁺ kg ⁻¹					
0-20 cm	Sol sous jachère	0,85 ^a	0,41 ^a	0,13 ^a	0,04 ^a	1,42 ^a	1,98
	Sol sous culture attelée	1,46 ^a	0,43 ^a	0,20 ^a	0,03 ^a	2,13 ^a	3,40
	Sol sous culture motorisée	1,19 ^a	0,47 ^a	0,15 ^a	0,03 ^a	1,84 ^a	2,53
Probabilité (5%)		0,141	0,538	0,135	0,296	0,15	
20-40 cm	Sol sous jachère	0,91 ^b	0,49 ^b	0,11 ^a	0,03 ^b	1,54 ^b	1,86
	Sol sous culture attelée	1,32 ^{ab}	0,68 ^{ab}	0,11 ^a	0,04 ^a	2,15 ^{ab}	1,94
	Sol sous culture motorisée	1,66 ^a	0,83 ^a	0,12 ^a	0,03 ^b	2,64 ^a	2,00
Probabilité (5%)		0,048	0,024	0,702	0,05	0,038	

Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. Chaque valeur dans le tableau représente la moyenne de 6 mesures.

Par rapport à la culture attelée, on observe, dans la couche 0-20 cm, que les teneurs en Ca^{2+} et en Mg^{2+} , ainsi que la SBE décroissent davantage avec la culture motorisée, qui se révèle être une pratique acidifiante pour le sol (Tableau XIX).

De façon générale, les réserves en bases échangeables sont plus importantes dans les sols cultivés que dans les sols sous jachère dont le niveau de dégradation est avancé. De ce fait, la SBE des sols sous jachère (1,42 et 1,54 cmol⁺ kg⁻¹, respectivement, sur 0-20 cm et 20-40 cm), est plus faible que celle des sols sous culture attelée ou motorisée. La pratique de la culture motorisée se révèle plus acidifiante que la culture attelée, sur l'horizon 0-20 cm, contrairement à ce qui est observé sur l'horizon 20-40 cm.

4.3.2.4. Saturation du complexe adsorbant

Il apparaît, à l'examen du tableau XX, une tendance à la désaturation de l'ensemble des sols, qui est plus marquée sous la culture motorisée qu'en culture attelée. La saturation du complexe en cations alcalins et alcalino-terreux des sols bruns eutrophes (cambisols) qui varie de 74 à 87% est satisfaisante. En revanche, les sols ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols), avec des taux de saturation variant, respectivement, de 56 à 73% et de 49 à 61%, sont moyennement désaturés. Cette désaturation de ces sols tend à s'accroître en profondeur (20-40 cm) et s'accompagne d'une acidification du sol, en dépit de la faible corrélation souvent observée entre le taux de saturation du complexe adsorbant et le pH.

Tableau XX. Taux de saturation du complexe adsorbant des sols étudiés

Modes d'exploitation des terres	Sol brun eutrophe (cambisol) Boni		Sol ferrugineux (lixisol) Dohoun		Sol ferrallitique (ferralsol) Balla	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
	V (%)					
Sol sous jachère	74,1 ^b	74,8 ^b	61,5 ^a	57,5 ^b	60,7 ^a	54,8 ^a
Sol sous culture attelée	85,0 ^a	86,9 ^a	68,2 ^a	73,0 ^a	58,2 ^a	57,0 ^a
Sol sous culture motorisée	-	-	59,4 ^a	55,8 ^b	61,3 ^a	49,2 ^a
Probabilité 5%	0,016	0,007	0,382	0,002	0,786	0,339
Signification	s	s	ns	s	ns	ns

- : valeur non déterminée. Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. ns = non significatif, s = significatif. Chaque valeur dans le tableau représente la moyenne de 6 mesures.

Le tableau XXI montre que la nature du sol influence de façon significative les taux de saturation du complexe adsorbant en bases échangeables ($p < 0,0001$).

Tableau XXI. Taux de saturation des sols sur 0-60 cm

Mode d'exploitation des terres	Sol brun eutrophe (cambisol) Boni	Sol ferrugineux (lixisol) Dohoun	Sol ferrallitique (ferralsol) Balla
	V (%)		
Sol sous jachère	69	55	37
Sol sous culture attelée	76	61	44
Sol sous culture motorisée	-	49	39
Moyenne (type de sol)	71	55	40
Types de sol	$< 0,0001$		
Mode d'exploitation des terres	0,002		
Types de sol x Mode d'exploitation des terres	$< 0,0001$		

- : valeur non déterminée. Les valeurs présentées dans le tableau sont issues de chacun des profils pédologiques des trois types de sol.

Alors que la saturation des sols bruns eutrophes (cambisols) (71%) est satisfaisante, les sols ferrugineux (lixisols) et les sols ferrallitiques (ferralsols) sont moyennement et fortement désaturés, avec des valeurs respectives de 55 et 40%. La désaturation du complexe adsorbant est aggravée par la culture motorisée, de même que le risque d'acidification de ces sols.

4.3.3. Evolution de la capacité d'échange cationique (CEC) des sols

La détermination de la capacité d'échange cationique du sol constitue un outil de diagnostic précieux de l'évolution de la qualité des sols, au plan chimique, physique et biologique. La capacité d'échange cationique renseigne sur d'importantes propriétés du sol, notamment son aptitude à retenir les cations et à raisonner leur mobilité dans le sol (Ciesielski *et al.*, 2008).

Les différences entre les trois types de sol sont importantes en ce qui concerne la capacité d'échange cationique (Tableau XXII).

Tableau XXII. Capacité d'échange cationique des sols étudiés

Modes d'exploitation des terres	Sol brun eutrophe (cambisol) Boni		Sol ferrugineux (lixisol) Dohoun		Sol ferrallitique (ferralsol) Balla	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
	$\text{cmol}^+\text{kg}^{-1}$					
Sol sous jachère	19,26 ^b	20,00 ^b	9,92 ^b	8,43 ^a	2,36 ^a	2,80 ^b
Sol sous culture attelée	29,10 ^a	31,14 ^a	14,11 ^a	11,79 ^a	3,68 ^a	3,84 ^{ab}
Sol sous culture motorisée	-	-	5,46 ^c	4,85 ^b	3,00 ^a	5,33 ^a
Probabilité 5%	0,019	0,021	0,003	0,017	0,129	0,030
Signification	s	s	s	s	ns	s

- : valeur non déterminée. Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. ns = non significatif, s = significatif. Chaque valeur dans le tableau représente la moyenne de 6 mesures.

Les CEC des sols ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols) sont, respectivement, 2 et 9 fois inférieures à celles des sols bruns eutrophes (cambisols). En considérant les sols cultivés, les valeurs de la CEC sont en baisse sous la culture motorisée, comparativement à la culture attelée. Cela se traduit par une chute de la CEC de 18 et 60% dans les sols ferrallitiques (ferralsols) et ferrugineux (lixisols) sous culture motorisée. La CEC est faible dans les sols sous jachère, où elle est généralement inférieure à celle des sols sous culture attelée (Tableau XXII).

Dans les sols bruns eutrophes (cambisols) cultivés, les CEC sols sont significativement élevées par rapport à la jachère et n'indiquent pas de risque d'acidification. La CEC des sols bruns eutrophes (cambisols) et des sols ferrallitiques (ferralsols) augmente en profondeur, sur 20-40 cm, contrairement à celle des sols ferrugineux (lixisols) (Tableau XXII).

Le tableau XXIII montre que le type de sol influence de façon significative la capacité d'échange totale du complexe adsorbant ($p < 0,0001$).

Tableau XXIII. Capacité d'échange cationique des sols sur 0-60 cm

Modes d'exploitation des terres	Sol brun eutrophe (cambisol) Boni	Sol ferrugineux (lixisol) Dohoun	Sol ferrallitique (ferralsol) Balla
	cmol ⁺ kg ⁻¹		
Sol sous jachère	19,69	10,03	4,60
Sol sous culture attelée	27,58	14,72	5,01
Sol sous culture motorisée	-	5,83	5,08
Moyenne	22,47	10,19	4,89

Types de sol < 0,0001
Modes d'exploitation des terres = 0,002
Types de sol x Modes d'exploitation des terres < 0,0001

- : valeur non déterminée. Les valeurs présentées dans le tableau sont issues de chacun des profils pédologiques des trois types de sol.

La CEC des sols bruns eutrophes (cambisols) (22,47 cmol⁺ kg⁻¹ de sol) est significativement supérieure à celle des sols ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols). La CEC des sols bruns eutrophes (cambisols) est, respectivement, 2 et 4 fois supérieure à celle des sols ferrugineux (lixisols) et des sols ferrallitiques (ferralsols). Les modes d'exploitation des terres ont un effet significatif sur la CEC ($p = 0,002$), qui est affectée par une baisse sensible sous la culture motorisée plus acidifiante que la culture attelée.

4.3.4. Corrélation entre la CEC et le carbone organique

Les matrices de Pearson ont été utilisées pour déterminer sur les trois types de sol, les corrélations entre la CEC et le carbone total, deux paramètres qui contrôlent l'acidité. Dans les sols bruns eutrophes (cambisols) (Annexe 7), la corrélation entre la CEC et le carbone est négative et non significative (Figure 10). En revanche, dans les sols ferrugineux (lixisols) (Annexe 8) et ferrallitiques (ferralsols) (Annexe 9), la CEC est positivement corrélée au carbone, comme l'indiquent les figures 11 et 12. Le carbone total est étroitement lié à la CEC de façon significative dans les sols ferrugineux (lixisols) ($p < 0,0001$, $r^2 = 0,72$) et ferrallitiques (ferralsols) ($p = 0,003$; $r^2 = 0,68$).

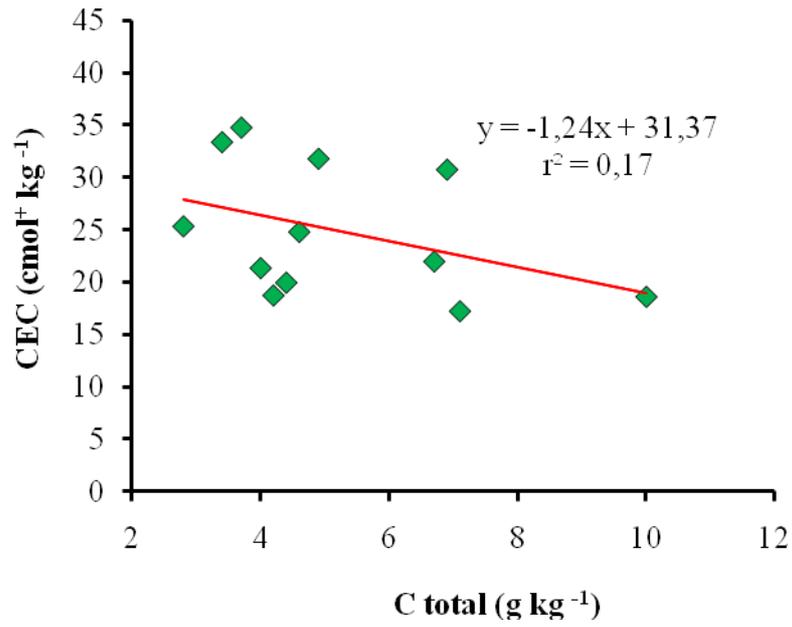


Figure 10. Corrélation entre la CEC et le carbone total sur les sols bruns eutrophes (cambisols) du site de Boni

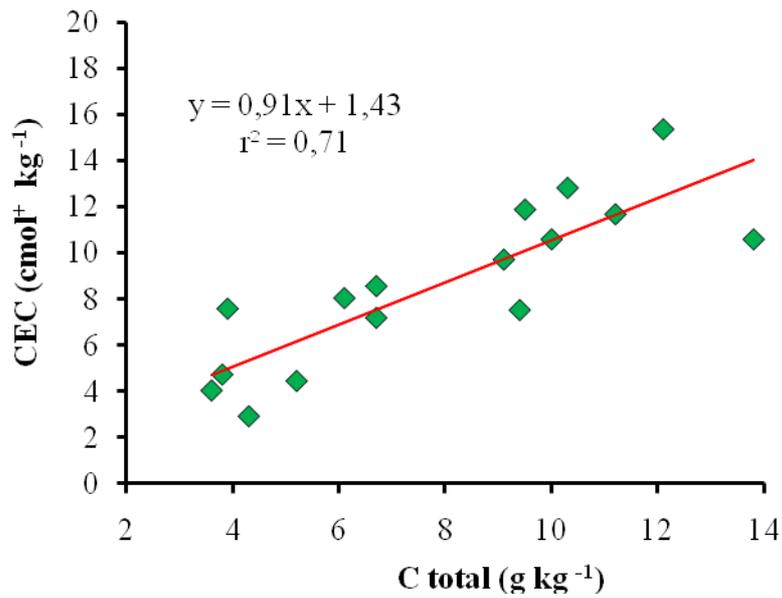


Figure 11. Corrélation entre la CEC et le carbone total sur les sols ferrugineux (lixisols) du site de Dohoun

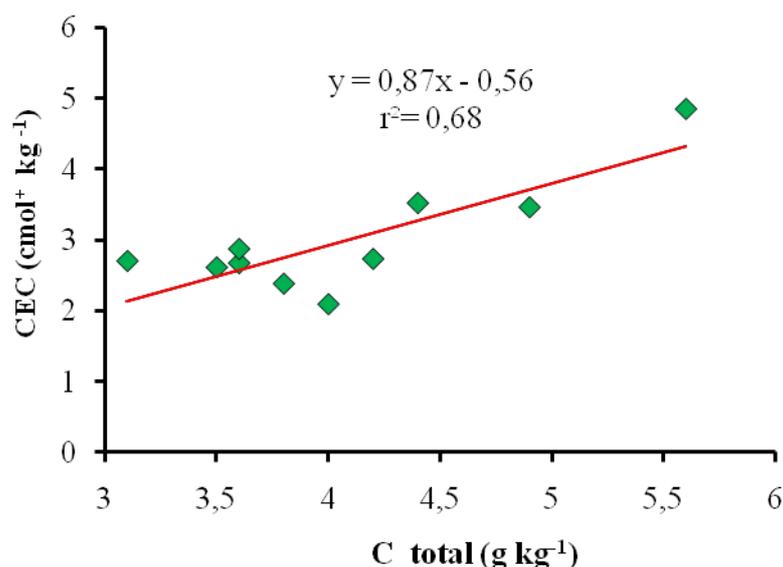


Figure 12. Corrélation entre la CEC et le carbone total sur les sols ferrallitiques (ferralsols) du site de Balla

4.4. Effets des modes d’exploitation des terres sur la réaction des sols

4.4.1. Evolution du pH des sols bruns eutrophes (cambisols)

Les valeurs des pH eau et pH KCl présentées dans le tableau XXIV indiquent que les sols bruns eutrophes (cambisols) sont faiblement acides à neutres. L’exploitation continue des terres n’a pas accru l’acidité des sols, qui est plus faible sous culture attelée où les pH eau sont significativement supérieurs à ceux des sols sous jachère.

Tableau XXIV. pH eau et pH KCl des sols bruns eutrophes (cambisols) de Boni

Modes d’exploitation des terres	pH eau		pH KCl	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
Sol sous jachère	6,49 ^b	6,34 ^b	5,24 ^a	5,17 ^a
Sol sous culture attelée	7,12 ^a	7,07 ^a	5,76 ^a	5,81 ^a
Probabilité (5%)	0,020	0,031	0,130	0,256
Signification	s	s	ns	ns

Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. ns : non significatif, s : significatif. Chaque valeur dans le tableau représente la moyenne de 6 mesures.

Les résultats d’analyses des sols issus des profils pédologiques (Tableau XXV), révèlent une très faible acidité des sols cultivés ou sous jachère dont les pH eau varient de 6,1 à 6,6. Les teneurs en aluminium échangeable (0,05 à 0,15 cmol⁺ kg⁻¹) et en cation H⁺ sont assez faibles dans ces sols cultivés ou sous jachère. Par rapport à la jachère, la mise en culture des sols bruns eutrophes (cambisols) ne semble pas accentuer l’acidité.

Tableau XXV. pH et acidité d'échange (Al^{3+} et H^+) des sols bruns eutrophes (cambisols) de Boni

Modes d'exploitation des terres	Profondeurs (cm)	pH eau	pH KCl	Al ³⁺ H ⁺		Al ³⁺ / (Al ³⁺ +H ⁺)	H ⁺ / (Al ³⁺ +H ⁺)
				cmol ⁺ kg ⁻¹			
Sol sous jachère	0-12	6,4	5,4	0,1	0,38	0,21	0,79
	12-30	6,1	5,2	0,15	0,48	0,24	0,76
Sol sous culture attelée	0-16	6,3	5,3	0,1	0,38	0,21	0,79
	16-40	6,6	5,4	0,05	0,53	0,09	0,91

Les valeurs présentées dans le tableau sont issues de chacun des profils pédologiques.

4.4.2. Réaction des sols ferrugineux (lixisols)

Les sols ferrugineux (lixisols) sous jachère et sous culture attelée, avec des pH eau compris entre 5,6 et 6,2, sont moyennement acides (Tableau XXVI). En revanche, ces sols sous culture motorisée sont fortement acides, avec des pH eau de 5,7 et 5,4, respectivement, sur 0-20 cm et 20-40 cm. Les pH KCl dans les sols sous culture motorisée sont significativement inférieurs à ceux des sols sous jachère et sous culture attelée. Par rapport au sol sous culture attelée, la culture motorisée accentue l'acidification des sols ferrugineux (lixisols).

Tableau XXVI. pH eau et pH KCl des sols ferrugineux (lixisols) de Dohoun

Modes d'exploitation des terres	pH eau		pH KCl	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
Sol sous jachère	5,84 ^a	5,68 ^{ab}	4,93 ^a	4,69 ^a
Sol sous culture attelée	5,99 ^a	6,29 ^a	5,10 ^a	4,94 ^a
Sol sous culture motorisée	5,72 ^a	5,40 ^b	4,51 ^b	4,10 ^b
Probabilité (5%)	0,674	0,031	0,042	0,031
Signification	ns	s	s	s

Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. ns : non significatif, s : significatif. Chaque valeur dans le tableau représente la moyenne de 6 mesures.

L'analyse des sols issus des profils pédologiques révèle des valeurs de pH eau très variables dans les sols ferrugineux selon les modes d'exploitation des terres (Tableau XXVII).

Tableau XXVII. pH et acidité d'échange (Al^{3+} et H^+) des sols ferrugineux (lixisols) de Dohoun

Modes d'exploitation des terres	Profondeurs	pH eau	pH KCl	Al^{3+}	H^+	$\text{Al}^{3+}/(\text{Al}^{3+}+\text{H}^+)$	$\text{H}^+/(\text{Al}^{3+}+\text{H}^+)$
	cm			$\text{cmol}^+\text{kg}^{-1}$			
Sol sous jachère	0-6	5,61	4,94	0,1	0,53	0,16	0,84
	6-15	5,36	5,17	0,1	0,48	0,17	0,83
	15-30	5,72	4,92	0,05	0,48	0,09	0,91
Sol sous culture attelée	0-6	7,08	6,7	0,05	0,33	0,13	0,87
	6-23	6,04	5,45	0,05	0,23	0,18	0,82
	23-39	5,89	5,23	0,05	0,18	0,22	0,78
Sol sous culture motorisée	0-8	5,22	4,9	0,05	0,43	0,10	0,90
	8-15	6,36	5,74	0,05	0,33	0,13	0,87

Les valeurs présentées dans le tableau sont issues de chacun des trois profils pédologiques.

Dans l'horizon superficiel (0-6 cm) du sol sous culture attelée, le pH eau de 7,3 est supérieur aux pH eau des sols sous culture motorisée et sous jachère, qui sont respectivement, de 5,2 et 5,6. Dans le sol sous culture motorisée, l'acidité est très forte dans l'horizon 0-8 cm alors qu'elle est faible dans l'horizon 8-15 cm. Les teneurs en aluminium échangeable (0,05 à 0,1 $\text{cmol}^+\text{kg}^{-1}$) et en cations H^+ (0,18 à 0,53 $\text{cmol}^+\text{kg}^{-1}$) sur le complexe adsorbant sont assez faibles.

4.4.3. Réaction des sols ferrallitiques (ferralsols)

L'horizon superficiel 0-20 cm des sols ferrallitiques (ferralsols) indique que la culture motorisée entraîne une forte acidité (pH eau de 5,2), alors que les sols sous jachère et sous culture attelée sont moyennement acides, avec des valeurs de pH eau $> 5,9$ (Tableau XXVIII). Dans l'horizon 20-40 cm, les sols ferrallitiques paraissent, dans l'ensemble, fortement acides, avec des valeurs de pH eau compris entre 4,8 et 5,3. Par rapport à l'horizon de surface, on observe une augmentation sensible de l'acidification des sols ferrallitiques en profondeur.

Tableau XXVIII. pH eau et pH KCl des sols ferrallitiques (ferralsols) du site de Balla

Modes d'exploitation des terres	pH eau		pH KCl	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
Sol sous jachère	5,93 ^a	5,32 ^a	4,60 ^{ab}	3,95 ^a
Sol sous culture attelée	5,98 ^a	5,00 ^a	4,82 ^a	3,93 ^a
Sol sous culture motorisée	5,17 ^b	4,80 ^a	4,14 ^b	3,99 ^a
Probabilité (5%)	0,006	0,296	0,035	0,965
Signification	s	ns	s	ns

Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. ns = non significatif, s = significatif. Chaque valeur dans le tableau représente la moyenne de 6 mesures.

Les résultats d'analyses des sols issus des profils pédologiques montrent, dans les sols ferrallitiques (ferralsols) que le pH eau est de l'ordre de 4,6 à 5,6 sous jachère, de 4,9 à 5,5 sous culture attelée et de 5,2 à 5,6 sous culture motorisée (Tableau XXIX). De façon générale, le pH eau diminue en profondeur, surtout dans les sols sous jachère et sous culture attelée. Les teneurs en aluminium échangeable sont très variables, avec la plus forte valeur qui est de 0,65 $\text{cmol}^+\text{kg}^{-1}$ observée au pH eau de 4,6 dans le sol sous jachère. Comme l'aluminium échangeable, les concentrations en cation H^+ sont plus élevées dans le sol sous jachère que dans les sols cultivés.

Tableau XXIX. pH et acidité d'échange (Al^{3+} et H^+) des sols ferrallitiques (ferralsols) de Balla

Modes d'exploitation des terres	Profondeurs cm	pH eau	pH KCl	Al ³⁺ H ⁺		Al ³⁺ /(Al ³⁺ +H ⁺)	H ⁺ /(Al ³⁺ +H ⁺)
				cmol ⁺ kg ⁻¹			
Sol sous jachère	0-6	5,62	5,05	0,05	0,13	0,28	0,72
	6-28	4,89	4,52	0,2	0,33	0,38	0,62
	28-40	4,6	4,4	0,65	0,63	0,51	0,49
Sol sous culture attelée	0-10	5,5	5,22	0,05	0,08	0,38	0,62
	10-24	5,3	4,9	0,05	0,08	0,38	0,62
	24-55	4,98	4,65	0,15	0,18	0,45	0,55
Sol sous culture motorisée	0-15	5,24	4,58	0,08	0,1	0,44	0,56
	15-30	5,62	4,86	0,08	0,05	0,62	0,38

Les valeurs présentées dans le tableau sont issues de chacun des trois profils pédologiques.

4.4.4. Effets des modes d'exploitation des sols sur l'acidité et l'aluminium échangeable

Les sols bruns eutrophes (cambisols), ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols) présentent des niveaux d'acidité variables, qui sont peu influencés par les modes d'exploitation des terres (Tableau XXX).

Tableau XXX. pH eau des sols sur 0-60 cm

Mode d'exploitation des terres	Sol brun eutrophe (cambisols) Boni	Sol ferrugineux (lixisols) Dohoun	Sol ferrallitique (ferralsols) Balla
	pH eau		
Sol sous jachère	6,28	5,56	5,04
Sol sous culture attelée	6,44	6,33	5,26
Sol sous culture motorisée	-	5,79	5,43
Moyennes (Types de sol)	6,4	5,89	5,24

Types de sol = 0,002

Mode d'exploitation des terres = 0,116

Types de sols x Mode d'exploitation des terres = 0,034

Les valeurs dans le tableau sont issues de chacun des profils pédologiques des trois types de sol.

Les valeurs de pH eau diffèrent significativement selon la nature du sol (Tableau XXX). Quelle que soit l'exploitation des terres, les sols bruns eutrophes (cambisols) sont faiblement acides, voire neutres (pH eau de 6,4), tandis que les sols ferrugineux (lixisols) sont moyennement acides (pH eau de 5,9) et les sols ferrallitiques (ferralsols) fortement acides (pH eau de 5,2).

Les teneurs en aluminium échangeable dans les trois types de sol sont très faibles et ne sont influencées, ni par la nature du sol ($p = 0,187$), ni par les modes d'exploitation des terres ($p = 0,160$). Les concentrations en aluminium échangeable se trouvent plus élevées dans les sols sous jachère que dans les sols cultivés (Tableau XXXI). Dans le sol ferrallitique sous jachère, l'on a déterminé une teneur de $0,30 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$ d'aluminium échangeable, qui dépasse le seuil de toxicité aluminique de $0,22 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$ (Rabeharisoa, 2004). Le risque de toxicité aluminique est très faible pour l'ensemble de ces sols.

Tableau XXXI. Teneurs en aluminium échangeable des sols

Mode d'exploitation des terres	Sol brun eutrophe (cambisols) Boni	Sol ferrugineux (lixisols) Dohoun	Sol ferrallitique (ferralsols) Balla
	Al ³⁺ (cmol ⁺ kg ⁻¹)		
Sol sous jachère	0,13	0,083	0,30
Sol sous culture attelée	0,08	0,050	0,08
Sol sous culture motorisée	-	0,050	0,08
Moyennes (Types de sol)	0,04	0,06	0,15

Types de sol = 0,187
Mode d'exploitation des terres = 0,160
Types de sols x Mode d'exploitation des terres = 0,038

Les valeurs présentées dans le tableau sont issues de chacun des profils pédologiques des trois types de sol.

4.4.5. Corrélations entre pH et bases échangeables du sol

Dans les sols bruns eutrophes (cambisols), le pH eau est positivement corrélé aux teneurs en Ca²⁺ échangeable ($p = 0,001$; $r^2 = 0,69$) et en Mg²⁺ échangeable ($p = 0,009$; $r^2 = 0,51$) constituant les cations majeurs du complexe adsorbant (Annexe 7). De même, on observe dans les sols ferrugineux (lixisols) (Annexe 8), une corrélation positive et significative entre le pH eau et le calcium échangeable ($p = 0,005$; $r^2 = 0,65$) ainsi qu'avec le Mg²⁺ échangeable ($p = 0,006$; $r^2 = 0,76$).

Par contre dans les sols ferrallitiques (ferralsols), il a été observé une corrélation négative et significative entre le pH eau et le Mg²⁺ échangeable ($p = 0,0002$; $r^2 = 0,83$). Dans ce cas, le pH eau n'est pas corrélé au Ca²⁺ échangeable (Annexe 9).

De manière générale, dans les sols bruns eutrophes (cambisols) et ferrugineux (lixisols), le pH eau est corrélé de façon significative à la SBE, à la CEC et au taux de saturation du complexe en bases (Annexes 7 et 8). Le taux de saturation augmente avec le pH, mais la relation est très lâche dans les sols ferrallitiques (ferralsols) dont le pH eau est inférieur à 5,5 ($r^2 = 0,17$).

En revanche, dans les trois types de sol, les teneurs en aluminium échangeable ne sont corrélées ni au pH eau, ni au pH KCl. Compte tenu des faibles teneurs en Al^{3+} échangeable obtenues dans les trois types de sol, il est plutôt plus pertinent d'examiner les corrélations entre l'acidité d'échange et les autres composantes chimiques du sol.

Dans les sols bruns eutrophes (cambisols), l'acidité d'échange n'est corrélée à aucun autre paramètre, étant donné que ces sols sont faiblement acides, voire neutres. En revanche, dans les sols ferrugineux (lixisols), on a trouvé des corrélations négatives et significatives entre l'acidité d'échange et le Ca^{2+} échangeable ($p = 0,044$; $r^2 = 0,26$), la somme des bases échangeables ($p = 0,047$; $r^2 = 0,25$), le pH eau et le pH KCl. Dans les sols ferrallitiques (ferralsols), il existe une corrélation négative significative entre l'acidité d'échange et le pH eau ($p < 0,0001$; $r^2 = 0,88$) et le pH KCl ($p = 0,0003$; $r^2 = 0,81$).

Il ressort que l'acidité du sol, représentée par le pH eau, est étroitement liée aux cations majeurs Ca^{2+} et Mg^{2+} , à la SBE et à la CEC, qui sont des paramètres importants pour apprécier l'acidité des sols.

4.5. Discussion

4.5.1. Description des caractéristiques morphologiques des sols

Les résultats ont montré une faible variation de la plupart des critères morphologiques des différents sols cultivés ou en jachère. L'homogénéité de la couleur du profil des sols bruns eutrophes (cambisols) serait liée à la prédominance d'argiles et de limons dans ces sols. En revanche, les fortes variations des couleurs notées dans les sols ferrugineux et ferrallitiques, seraient liées aux réactions très complexes d'oxydo-réduction durant leur formation, et qui se poursuivent avec l'exploitation de ces sols (Boizard *et al.*, 2004). Diverses modifications des propriétés physiques du sol, dont une amélioration de sa stabilité sous l'effet de la jachère, ont été signalées par Yemefack et Nounamo (2000). La consistance, plus dure, observée dans les sols sous jachère, confirme cette amélioration de la stabilité par la jachère, et met en évidence une fragilisation des sols consécutive à leur mise en culture (Ouattara *et al.*, 2000 ; Cousin *et al.*, 2004). De plus, l'aération et la stabilisation sont deux améliorations majeures qui justifient l'effet favorable au rendement de la jachère d'après Boli et Roose (2000). Sur les trois types de sols,

l'exploitation continue des terres n'a pas pour l'instant affecté l'activité biologique et la présence de racines dans le profil, qui sont comparables à celles des sols sous jachère.

4.5.2. Effet des modes d'exploitation des terres sur la granulométrie et l'acidification des sols

A l'opposé des sols bruns eutrophes, le sable est la fraction granulométrique la plus représentative dans les sols ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols) pauvres en argile, qui conditionne la fixation des éléments minéraux sur le complexe adsorbant (Fanning *et al.*, 1989 ; Elsass, 2005). L'acidité d'un sol est contrôlée par les charges électriques présentes à la surface de ses constituants argileux et organiques (Elsass, 2005). Les résultats de l'analyse granulométrique ont montré que les sols bruns eutrophes (cambisols) ont des teneurs élevées en argile. Cette argile est généralement de type montmorillonite dominante, plus chargée électriquement que la kaolinite prédominante dans les sols ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols). La ferrallitisation est une évolution dans laquelle tous les matériaux primaires du sol, hormis le quartz, sont altérés. Seule la kaolinite associée à l'alumine résiduelle (gibbsite) et en mélange avec les oxydes de fer, se rencontre dans le profil.

L'appauvrissement en argile de la partie supérieure des sols cultivés, surtout sous culture motorisée, s'explique par le lessivage des argiles et leur entraînement en profondeur (Son *et al.*, 2004, Lalsaga, 2007). Ceci diminue, non seulement la teneur en colloïdes minéraux, mais aussi celle des colloïdes organiques des sols (Yemefack *et al.*, 2004). La forte proportion de sable trouvée dans l'horizon superficiel des sols cultivés serait due aux effets destructurants du labour, surtout réalisé au tracteur que rapportent Ouattara *et al.* (2000). Dans des exploitations en culture attelée et motorisée du village de Balla, Traoré *et al.* (2007 b), analysant les propriétés des sols cultivés depuis plus de 20 années, ont trouvé des teneurs en sable élevées en fonction du niveau d'équipement des producteurs. L'exploitation des terres contribue à une déstructuration du sol (Barthès *et al.*, 1998) sans négliger une perte du taux d'argile qui affecte le complexe adsorbant, exposant ainsi les sols à l'acidification.

4.5.3. Evolution des éléments totaux et acidification des sols

Ces sols sont dans leur ensemble pauvres en phosphore, avec des teneurs qui se situent en deçà du seuil critique de 200 mg kg^{-1} pour le P total (Lompo *et al.*, 1995 ; Lalsaga, 2007). La mise en jachère des sols n'améliore pas les teneurs en phosphore qui doit être nécessairement apporté sous diverses formes au sol, d'après Tchienkoua et Zech (2000). En surface, les quantités de phosphore assimilable des sols cultivés sont plus élevées que celles des sols sous jachère, du fait de l'utilisation des engrais minéraux évoquée par Yemefack et Nounamo (2000).

La baisse des teneurs en potassium est liée à la mise en culture des sols et est accentuée par la culture motorisée. Selon Olivier *et al.* (2000), la dynamique du potassium disponible est plutôt liée à la nature des argiles qu'aux teneurs en matière organique, généralement faibles dans ces sols. La baisse des teneurs en P total et en K total, consécutive à l'exploitation des terres, expose les sols à l'acidification par la perte de cations qui seraient remplacés sur le complexe adsorbant par des ions acides (H^+ , Al^{3+}).

Les faibles corrélations notées entre le pH eau, les teneurs en Ca total et en Mg total montrent que ces paramètres n'influencent pas directement l'acidité sur les trois types de sol étudiés. Pourtant, la baisse du Ca total et du Mg total entraînée par la mise en culture de ces sols qui sont d'ailleurs pauvres, affecte le complexe adsorbant et sa composition, augmentant ainsi leur risque d'acidification (Lesturgez *et al.*, 2004). En revanche, l'augmentation en profondeur des teneurs en fer et en manganèse dans le sol brun eutrophe (cambisol), montre que la mise en culture du sol entraîne un accroissement des teneurs en ces éléments par rapport à la jachère. Ces éléments métalliques, qui deviennent solubles à faible pH, sont susceptibles d'induire des phénomènes de toxicité (Genot *et al.*, 2009).

4.5.4. Evolution du carbone et de l'azote sur l'acidification des sols

Les résultats ont révélé de faibles teneurs en carbone qui confirment la pauvreté en matière organique des sols bruns eutrophes (cambisols), ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols), quel que soit le mode d'exploitation (Whalen *et al.*, 2000 ; Sawadogo *et al.*, 2008, Pallo *et al.*, 2009). Dans ces sols, la vitesse de décomposition de la matière organique est normale, étant donné que les rapports C/N sont compris entre 8 et 12 (Boyadgiev, 1980). La diminution du taux de carbone en profondeur s'expliquerait alors par une vitesse de minéralisation de la matière organique plus élevée qu'en surface, où s'accumulent les débris organiques. Les faibles stocks de matière organique dans ces sols les prédisposeraient à une acidification et à une dégradation rapide (Wolkoff *et al.*, 1999) car, d'après Pallo *et al.* (2006 et 2008), la fertilité des sols en zone tropicale repose principalement sur la matière organique.

Dans les horizons de surface des trois types de sol, les résultats ont montré des teneurs en carbone plus élevées sous la jachère que sous les sols cultivés. Cela serait imputable à la régénération de la fertilité par la jachère, que rapportent Abbadie *et al.* (2000). D'après Somé *et al.* (2007), la jachère favorise une amélioration du statut organique du sol et, partant, une amélioration des propriétés physiques et biologiques (Zombré, 2006). Dans les trois sols, l'absence d'amélioration sensible du taux de carbone en profondeur confirme les limites de la

jachère, soulignées par Boli et Roose (2000). L'amélioration des stocks de matière organique en surface par la jachère est susceptible d'atténuer le processus d'acidification du sol.

Pour les trois sols cultivés, les résultats ont révélé une baisse des teneurs en carbone et en azote, provoquée par la mise en culture continue de ces sols. Cette baisse de la teneur en matière organique sur des sols cultivés est imputable à la pratique des producteurs, qui ne permet pas de compenser les pertes de matière organique (Traoré *et al.*, 2007a). Elle est aussi provoquée par le travail du sol qui conduit, d'après Korboulewsky *et al.* (2001), à une perte de carbone par minéralisation et par érosion hydrique. Par rapport à la culture attelée, la baisse des teneurs en carbone a été accentuée en culture motorisée, ce que justifie Ouattara *et al.* (2006) par l'étroite dépendance entre la baisse de la matière organique du sol et son intensité culturale. Cela conduit à un appauvrissement plus important des sols ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols) en culture motorisée, les rendant ainsi vulnérables à l'acidification.

4.5.5. Evolution des bases échangeables et de la saturation du complexe adsorbant

Les résultats obtenus sur les sols bruns eutrophes (cambisols) montrent que ces derniers, du fait de leur richesse en bases échangeables, sont relativement peu exposés à l'acidification. L'effet de la mise en culture de ces sols n'a pas affecté les réserves en bases échangeables, qui sont plus élevées que sous la jachère. Cela témoigne, comme le rapportent Somé *et al.* (2007), que le processus de restauration de la fertilité chimique par la jachère naturelle est très long et souvent controversé. Les teneurs en K^+ échangeable des sols bruns eutrophes (cambisols), nettement supérieures à $0,2 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$, sont jugées élevées selon Landon (1991). Les valeurs élevées de la SBE traduisent une bonne fertilité chimique des sols bruns eutrophes (cambisols), considérés comme les sols les plus riches du Burkina Faso (Bunasols, 1987 ; Zombré, 2003). La dynamique des réserves en bases échangeables de ces sols n'indique pas de risques d'acidification pour l'instant.

Les résultats ont montré que la SBE, qui est liée à la nature du sol, est plus faible dans les sols ferrugineux (lixisols) que dans les sols bruns eutrophes (cambisols). Alors que les teneurs en Ca^{2+} des sols ferrugineux (lixisols) sous culture attelée sont satisfaisantes, la pratique de la culture motorisée conduit à des teneurs jugées faibles, d'après Landon (1991). Sur ces sols, les teneurs en Mg^{2+} sont acceptables, même si les valeurs obtenues suite à l'exploitation des terres en culture motorisée sont proches du seuil de déficience en magnésium dans les sols tropicaux, qui est fixé à $0,5 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$ par Landon (1991). Les plus faibles réserves en bases échangeables ont été notées sous culture motorisée, ce qui suggère

que ce mode d'exploitation des terres entraîne d'importantes pertes de cations échangeables, conduisant progressivement à l'acidification du sol.

Les faibles valeurs des réserves en bases échangeables sur les sols ferrallitiques (ferralsols) dénotent que ces sols sont chimiquement pauvres, notamment en Ca^{2+} et Mg^{2+} et plus exposés à l'acidification (Mbonigaba Muhinda *et al.*, 2009). En considérant le seuil de déficience en magnésium qui est de $0,5 \text{ cmol}^+\text{kg}^{-1}$ d'après Landon (1991), l'horizon superficiel (0-20 cm) des sols ferrallitiques (ferralsols) serait déficient en cet élément. La faiblesse des réserves en bases échangeables notée sur les sols ferrallitiques (ferralsols) cultivés pourrait être attribuée aux pertes des cations alcalins (Na^+ et K^+) et alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) et leur remplacement par des cations acides (H^+ , Al^{3+} , Mn^+), évoquées par Pieri (1989). La pauvreté de la jachère en bases échangeables indique que le processus de restauration de la fertilité chimique, notamment l'amélioration du complexe adsorbant par l'effet de la jachère naturelle seule, est souvent très long (Boizard *et al.*, 2004). Cette pauvreté des réserves en bases échangeables des sols s'expliquerait aussi par les très faibles taux de matière organique ; or la matière organique constitue le principal facteur déterminant la rétention des cations sur le complexe adsorbant (Pallo *et al.*, 2009). La forte variabilité des réserves en bases échangeables dans les sols bruns eutrophes (cambisols), ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols) témoigne de l'importance de la nature du sol sur le risque d'acidification de celui-ci.

Les résultats ont aussi mis en évidence une forte désaturation des sols ferrallitiques (ferralsols), qui traduit à juste titre, un état défavorable du complexe adsorbant. Ces sols, du fait de leur faible potentiel chimique initial, paraissent plus sensibles à la dégradation après leur mise en culture. A ce propos, Roose et Barthès (2006), rapportent que les sols ferrallitiques (ferralsols) perdent 50% de leur stock de matière organique après seulement 4 années de culture. De plus, les pertes de cations par lessivage, notamment de Ca^{2+} et Mg^{2+} , sont souvent évoquées comme des facteurs qui contribuent à la désaturation du complexe adsorbant de ces sols et à leur acidification.

4.5.6. Acidification des sols par l'évolution de la CEC

La CEC est une expression de charges négatives par unité de masse d'un sol qui représente l'une des plus importantes caractéristiques du sol (Mbonigaba Muhinda *et al.*, 2009). Les valeurs de la CEC sont jugées satisfaisantes dans les sols bruns eutrophes (cambisols), acceptables dans les sols ferrugineux (lixisols) et très faibles dans les sols ferrallitiques (ferralsols) (Bunasols, 1987 ; Landon, 1991). Les résultats indiquent que la

capacité de fixation de cations du complexe dépend davantage du type de sol que des modes d'exploitation des terres. Yeboua et Ballo (2000), rapportent que la capacité d'échange totale du sol dépend plus des colloïdes organiques que des argiles, souvent en quantité moindre et de type kaolinite, à faible capacité d'échange. Par conséquent, les valeurs de CEC les plus faibles observées dans les sols ferrallitiques (ferralsols) sont imputables à leur pauvreté en matière organique, ce qui les expose à l'acidification. La corrélation positive et significative trouvée entre la CEC et le C organique conforte cette dépendance de la capacité d'échange totale à la matière organique du sol. En revanche, dans les sols bruns eutrophes (cambisols), qui sont riches en argile, la CEC n'est pas corrélée à la matière organique, ce qui suggère dans ce cas, une influence plus marquée des argiles.

Les résultats montrent une baisse spectaculaire de la CEC dans les sols ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols) sous culture motorisée, ce qui peut être attribuée à un lessivage de l'argile, en relation avec les labours réalisés chaque année au tracteur (Yemefack *et al.*, 2004 ; Cousin *et al.*, 2004) et à l'emploi quasi exclusif d'engrais minéraux acidifiants (Pernes-Debuyser et Tessier, 2002). Sur ces sols relativement fragiles, l'adoption de techniques appropriées de travail du sol au tracteur s'impose. Cette disposition demeure tout aussi valable sous culture attelée, car, selon Ouattara (2009), une réduction des fréquences de labour permet d'améliorer les propriétés physiques et chimiques du sol comme la CEC. Les diverses pertes de cations échangeables, de la matière organique et le lessivage de l'argile, qui sont supposées être la conséquence de la culture motorisée, tendent à confirmer la dégradation du sol et son acidification.

La CEC d'un sol dépend des argiles et de la matière organique qui, par leurs propriétés colloïdales, peuvent développer des charges négatives importantes (Brady et Weil, 2002). Les grandes différences observées sur la capacité d'échange totale des trois types de sol sont en cohérence avec leurs compositions granulométriques ainsi que leurs teneurs en carbone organique. Selon Boyer (1982), l'argile dominante, la kaolinite, a une faible CEC, notamment dans les sols ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols). Les faibles valeurs de la CEC dans ces sols sont imputables à leur pauvreté en argile et en matière organique, qui semble s'aggraver suite à leur mise en culture. Cette faible capacité d'échange cationique est un bon indicateur de la vulnérabilité de ces sols à l'acidification, car elle conditionne le pouvoir tampon du sol, qui dépend de ses teneurs en argile et en matière organique. Dans les sols bruns eutrophes (cambisols) et ferrugineux (lixisols), les valeurs de CEC demeurent acceptables, à l'opposé des sols ferrallitiques (ferralsols) pour lesquels il convient d'améliorer le statut organique et réapprovisionner le complexe, notamment en calcium et en magnésium,

pour freiner une acidification déjà avancée. Il paraît d'ailleurs prudent de généraliser cette disposition à l'ensemble des trois sols étudiés.

4.5.7. Effets des modes d'exploitation des terres sur la réaction des sols

Les résultats montrent que les sols bruns eutrophes (cambisols) et ferrugineux tropicaux (lixisols), sont légèrement acides, tandis que les sols ferrallitiques (ferralsols) sont fortement acides. L'expression de l'acidité dépend de la nature du sol, comme le confirment les travaux de Kaitibie *et al.* (2002) qui précisent que l'acidification est un phénomène naturel lié à la pédogenèse, provoquée par la mise en culture et la dégradation progressive du sol. La ferrallitisation, qui débute par une hydrolyse neutre, puis une acidification, et qui est à l'origine de la formation et de l'évolution des sols ferrallitiques (ferralsols), explique leur acidité plus accentuée que celle des autres sols.

Les horizons supérieurs sont en général plus acides que les horizons sous-jacents, comme le soulignent les travaux de Pallo et Thombiano (1989). Cette acidification plus prononcée en surface est liée à l'utilisation d'engrais minéraux acidifiants et à la fragilisation du sol par les labours répétés au tracteur, favorisant le lessivage du calcium et du magnésium du complexe (Pernes-Dubuyer et Tessier, 2002 ; Somé *et al.*, 2004). Yemefack et Nounamo (2000), justifient l'acidification souvent prononcée dans les sols en jachère, par la libération d'un certain nombre d'acides dans ces conditions. Dans les sols bruns eutrophes (cambisols) faiblement acides à neutres, les pH eau sont favorables à l'absorption de la plupart des éléments minéraux (Whalen *et al.*, 2000 ; Bertrand et Gigou, 2000). En revanche, dans les sols ferrugineux (lixisols) et ferrallitiques (ferralsols), qui sont, modérément à fortement, acides, les valeurs de pH eau qui sont en deçà du seuil de 5,5, pourraient être limitantes pour l'alimentation des plantes.

Dans les trois types de sol étudiés, l'on a noté de très faibles concentrations d'aluminium échangeable. La présence d'aluminium échangeable se traduit, par moment, par des valeurs élevées et supérieures au seuil critique de $0,22 \text{ cmol}^+\text{kg}^{-1}$ pour le cotonnier (Rabeharisoa, 2004). D'après Yemefack et Nounamo (2000), l'aluminium échangeable contribue pour près de 75% aux variations de l'acidité totale. Par conséquent, son apparition dans ces sols pourrait très rapidement évoluer et constituer des problèmes de toxicité aluminique, notamment dans les sols ferrallitiques (ferralsols) fortement acides (Ouédraogo *et al.*, 2001). L'aluminium échangeable, qui résulte de la dégradation des argiles, mais dont une partie, certainement non négligeable, proviendrait de l'altération du matériau parental qui se trouve être une roche fortement aluminisée, peut être complexé par la matière organique pour

donner une forme non soluble dans la solution du sol (Trinh, 1976 ; Oorts *et al.*, 2003). De ce fait, un apport de matière organique pourrait être bénéfique pour assurer une productivité durable sur ces sols. Dans tous les cas, des efforts devront être déployés pour améliorer le pH des sols. De façon générale, la nature du sol influence plus les principales caractéristiques des sols que les modes d'exploitation des terres. Les sols ferrallitiques (ferralsols) apparaissent chimiquement plus pauvres et plus fragiles que les sols ferrugineux (lixisols) et bruns eutrophes (cambisols), qui subissent une dégradation, une fois qu'ils sont mis en culture.

Conclusion

Cette étude a mis en évidence une acidification des sols sous culture, qui est principalement liée aux pratiques culturales en zone cotonnière. La mise en culture continue des terres entraîne une dégradation de la plupart des caractéristiques des sols. Elle se traduit par une baisse des teneurs en argile, en carbone et en azote, une chute de la teneur des éléments totaux, une lixiviation des bases échangeables, une désaturation du complexe adsorbant, ainsi qu'une baisse de la capacité d'échange cationique, entraînant la vulnérabilité de ces sols à l'acidification. En culture motorisée, cette dégradation du sol est plus importante et est d'autant plus marquée que les sols sont fragiles et pauvres en argile, comme c'est le cas des sols ferrugineux (lixisols) et des sols ferrallitiques (ferralsols), plus sensibles à l'acidification. La pauvreté en carbone, accentuée par la présence d'aluminium échangeable sur ces sols, suggère la nécessité de procéder à des amendements appropriés dans ce système de culture.

La régulation de l'acidification est une condition nécessaire au maintien et à l'équilibre des fonctions physiques, chimiques et biologiques des sols. C'est ce qui justifie l'étude, dans le chapitre suivant, des effets à court terme, des amendements calco-magnésiens dans les systèmes de culture à base de cotonnier. Avec l'exportation des résidus de récolte pratiquée par les paysans, il sera question d'examiner si ces amendements permettent de corriger l'acidification et de maintenir la fertilité du sol.

CHAPITRE 5. EFFET DES AMENDEMENTS CALCO-MAGNESIENS LOCAUX SUR L'ACIDITE, LES PROPRIETES CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DES SOLS

L'acidité du sol constitue une contrainte agronomique majeure, qui s'aggrave sous culture en zone cotonnière, et qu'il faut corriger par des amendements appropriés. L'acidité influence les caractères physico-chimiques, modifie les équilibres existant entre le sol et sa solution et, par conséquent, l'alimentation minérale des plantes cultivées ainsi que leurs rendements. La capacité de rétention des éléments nutritifs pour les plantes et le pouvoir tampon des sols acides sont à la base des recommandations pour l'application d'engrais ou d'amendements.

Cette étude conduite en station de recherche et en milieu paysan, visait à évaluer les effets des amendements en compost (6 t ha⁻¹), en dolomie(1,5 t ha⁻¹) en Burkina phosphate (0,3 t ha⁻¹), combinés à la fertilisation minérale, pour corriger l'acidification.

5.1. Nutrition minérale des cultures en station de recherche à Farako-bâ sur un sol ferrugineux (lixisol) acide

Dans une rotation triennale coton-maïs-sorgho, il a été déterminé sur un sol ferrugineux (lixisol) acide, les effets de l'apport des amendements sur la nutrition minérale des cultures.

5.1.1. Nutrition minérale du cotonnier

En première année d'étude sur ce sol ferrugineux (lixisol) fortement acide (pH eau de 5,3 à 5,6), l'acidité n'a pas affecté la nutrition minérale des cotonniers dont les teneurs en azote et en phosphore sont statistiquement homogènes sur le sol témoin non amendé, et sur les sols amendés. Les teneurs en azote et en phosphore des cotonniers augmentent entre 30 et 45 jours après les semis, mais elles baissent à 60 jours (Tableau XXXII).

Tableau XXXII. Evolution des teneurs en azote et en phosphore des cotonniers à 30, 45 et 60 jours après semis (année 2004)

Traitements	N (%)			P (%)		
	30 jas	45 jas	60 jas	30 jas	45 jas	60 jas
T1	3,25	3,99	2,79	0,89	1,12	0,94
T2	3,60	3,87	2,40	0,92	1,12	0,97
T3	3,37	3,76	2,44	0,83	1,12	0,98
T4	3,56	3,83	2,44	0,92	1,09	0,97
Probabilité (5%)	0,561	0,797	0,166	0,437	0,833	0,974
Signification	ns	ns	ns	ns	ns	ns

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm, T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm ; ns : non significatif.

A 30 jours après les semis, les teneurs en azote des cotonniers sur les sols amendés en compost (3,60%), en Burkina phosphate (3,37%) et en dolomie (3,56 %) sont supérieures à celles des cotonniers du sol témoin (3,25%). Par contre, à 45 et à 60 jours, comparativement au sol témoin non amendé, les teneurs en azote des cotonniers ont été plus faibles après les apports d'amendements. Sur le sol témoin, les cotonniers présentent au 60^e jour, un taux d'azote de 2,79%, qui est supérieur à ceux des sols amendés. La nutrition phosphatée des cotonniers à 30, 45 et 60 jours n'est pas améliorée par les amendements appliqués sur ce sol acide.

En 2004, la nutrition minérale globale des cotonniers, appréciée par les fonctions de production en azote F(N), en phosphore F(P), en potassium F(K) et en soufre F(S), est présentée dans le tableau XXXIII. Comparativement aux sols amendés, sur le témoin, la nutrition minérale des cotonniers n'est pas affectée par l'acidité du sol. Les fonctions de production en azote F(N), dont les valeurs sont comprises entre 76,7 et 85,4, indiquent une nutrition azotée déficiente des cotonniers pour tous les traitements. Les fonctions de production en azote des cotonniers sur les sols amendés par le compost (F(N) = 78,3) ou par le Burkina phosphate (F(N) = 76,7) ont au contraire baissé de façon significative par rapport à celles des cotonniers du sol témoin (F(N) = 85,4) (Tableau 33). L'apport des amendements sur ce sol acide n'améliore pas les fonctions de production en phosphore (F(P) > 100), en soufre (F(S) > 100) et en potassium (F(K) > 90), mais semble au contraire induire un effet dépressif sur la nutrition azotée des cotonniers.

Tableau XXXIII. Evaluation de la nutrition des cotonniers par les fonctions de production en azote F(N), en phosphore F(P), en potassium F(K) et en soufre F(S) à 70 jours après les semis (année 2004)

Traitements	F(N)	F(P)	F(K)	F(S)
T1	85,4 ^a	105,3 ^a	94,6 ^a	104,5 ^a
T2	78,3 ^b	105,7 ^a	94,7 ^a	105,8 ^a
T3	76,7 ^b	104,7 ^a	95,1 ^a	105,3 ^a
T4	78,8 ^{ab}	106,5 ^a	95,1 ^a	104,7 ^a
Probabilité (5%)	0,047	0,697	0,850	0,709
Signification	s	ns	ns	ns

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm, T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm. Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. ns : non significatif, s : significatif.

5.1.2. Nutrition minérale du maïs

En deuxième année d'étude (2005), la nutrition minérale du maïs a été peu influencée par les amendements de la première année, et par la fumure minérale apportée. A 60 et 80 jours après les semis, l'acidité du sol témoin n'affecte pas les teneurs en azote, en phosphore et en potassium du maïs, qui ne sont pas améliorées par les amendements (Tableau XXXIV).

Tableau XXXIV. Evolution des teneurs en azote, en phosphore et en potassium du maïs à 60 et 80 jours après semis (année 2005)

Traitements	N (% ms)		P (% ms)		K (% ms)	
	60 jas	80 jas	60 jas	80 jas	60 jas	80 jas
T1	2,58 ^a	2,81 ^a	0,67 ^a	0,78 ^a	3,32 ^a	4,35 ^a
T2	2,91 ^a	2,44 ^a	0,70 ^a	0,73 ^a	3,24 ^a	3,32 ^{ab}
T3	2,69 ^a	2,26 ^a	0,70 ^a	0,67 ^a	3,34 ^a	2,62 ^b
T4	2,91 ^a	2,59 ^a	0,76 ^a	0,72 ^a	3,73 ^a	3,12 ^{ab}
Probabilité (5%)	0,705	0,677	0,624	0,791	0,700	0,047
Signification	ns	ns	ns	ns	ns	s

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm, T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm ; ms : matière sèche. Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. ns : non significatif, s : significatif

Par rapport aux sols amendés, la nutrition azotée du maïs dans le sol témoin non amendé est plus faible à 60 jours, mais plus élevée à 80 jours, avec des teneurs en azote de 2,81%, en phosphore de 0,78% et en potassium de 4,35 %. Les teneurs en phosphore à 60 et 80 jours dépassent 0,6%, traduisant une très bonne nutrition phosphatée du maïs. Les teneurs du maïs en potassium n'ont pas été influencées au 60^e jour, contrairement au 80^e jour, où la nutrition potassique du maïs sur le sol témoin non amendé est significativement supérieure. Après 20 années d'exploitation continue des terres, l'état d'acidification actuel du sol n'influence pas la nutrition minérale du maïs, qui est satisfaite aussi bien sur le sol témoin que sur les sols amendés par le compost, le Burkina phosphate et la dolomie.

5.1.3. Nutrition minérale du sorgho

En troisième année d'étude (2006), les teneurs en éléments minéraux des feuilles de sorgho, déterminées à 60 jours après les semis, sont résumées dans le tableau XXXV.

Tableau XXXV. Teneurs en azote, en phosphore, en potassium et en soufre des feuilles de sorgho à 60 jours après semis (année 2006)

Traitements	N	P	K	S
	%			mg kg ⁻¹
T1	2,96 ^a	1,35 ^a	3,64 ^a	1,84 ^a
T2	2,40 ^a	0,94 ^a	2,90 ^b	0,82 ^a
T3	2,17 ^a	0,76 ^a	2,56 ^b	1,63 ^a
T4	2,94 ^a	1,11 ^a	2,78 ^b	0,92 ^a
Probabilité (5%)	0,138	0,802	0,006	0,725
Signification	ns	ns	s	ns

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm, T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm. Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. ns : non significatif, s : significatif.

Il ressort du tableau XXXV, que trois ans après l'application des amendements, à l'exception du potassium, les teneurs en azote, en phosphore et en soufre des plants de sorgho, sont statistiquement homogènes. Sur le sol témoin non amendé, les teneurs des plants de sorgho en éléments minéraux sont supérieures à celles des plants de sorgho cultivé sur les sols amendés. Les teneurs du sorgho en azote (2,17%), en phosphore (0,76%) et en potassium (2,56%) au niveau du sol amendé par le Burkina phosphate ont été les plus faibles. Comparativement au sol témoin fertilisé par les engrais minéraux acidifiants, les apports initiaux des amendements ont entraîné, sur le sorgho cultivé en troisième année, une baisse des teneurs en N, P, K et S. L'acidité du sol témoin n'a pas affecté la nutrition minérale du cotonnier, du maïs et du sorgho, qui est comparable à celle notée sur les sols amendés par le compost, le phosphate naturel tricalcique et la dolomie.

5.2. Effets des amendements sur les rendements en sols acides

5.2.1. Rendements des cultures en station de recherche à Farako-bâ

Sur sol ferrugineux (lixisol) fortement acide, les amendements associés à la fumure minérale ont amélioré les rendements du cotonnier, du maïs et du sorgho, par rapport au témoin fertilisé par la fumure minérale seule (Tableau XXXVI).

Tableau XXXVI. Rendements des cultures en station de recherche à Farako-bâ (2004 à 2006)

Traitements	Coton graine (2004)	Maïs grain (2005)	Sorgho grain (2006)
		kg ha ⁻¹	
T1	1563 ^b	3179 ^b	1594 ^b
T2	1812 ^a	3754 ^a	1831 ^a
T3	1589 ^{ab}	3484 ^{ab}	1804 ^a
T4	1727 ^{ab}	3693 ^a	1971 ^a
Probabilité (5%)	0,047	0,023	0,009
Signification	s	s	s

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm, T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm. Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. s : significatif.

L'apport de 6 t ha⁻¹ de compost a amélioré de façon significative les rendements par des suppléments de 249 kg ha⁻¹ de coton graine, 575 kg ha⁻¹ de maïs grain et 237 kg ha⁻¹ de sorgho grain, par rapport au témoin non amendé. L'efficacité de 6 t ha⁻¹ de compost et de 1,5 t ha⁻¹ de dolomie a été supérieure à celle de 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate sur les rendements des trois cultures. L'effet de la dolomie n'est pas significatif en première année sur le rendement du cotonnier. Par contre, en deuxième et troisième années, les arrière-effets de la

dolomie améliorent les rendements du maïs et du sorgho de façon significative. L'apport du phosphate naturel sur ce sol acide a permis un accroissement significatif du rendement du sorgho en troisième année.

5.2.2. Rendements des cultures sur les sites en milieu paysan

En milieu paysan, sur des sols faiblement acides (pH eau > 6), les amendements et la fumure minérale ont amélioré les rendements à Boni, à Dohoun et à Balla, respectivement, sur sol brun eutrophe, sol ferrugineux et sol ferrallitique (Tableau XXXVII).

Tableau XXXVII. Rendements en coton graine et maïs grain à Boni, Dohoun et Balla

Traitements	Coton graine (2006)			Maïs grain (2007)		
	Boni	Dohoun	Balla	Boni	Dohoun	Balla
	kg ha ⁻¹					
T1	1681 ^a	1008 ^a	1406 ^b	917 ^a	1100 ^a	917 ^b
T2	1878 ^a	1113 ^a	1426 ^b	1017 ^a	1267 ^a	2083 ^a
T3	1879 ^a	1059 ^a	1836 ^a	1033 ^a	1267 ^a	2058 ^a
T4	1766 ^a	1055 ^a	1816 ^a	1050 ^a	1200 ^a	1667 ^a
Probabilité (5%)	0,485	0,492	0,000	0,360	0,188	0,046
Signification	ns	ns	s	ns	ns	s

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm, T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm. Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. ns : non significatif, s : significatif.

Seuls les amendements en phosphate naturel et en dolomie ont accru de façon significative les rendements du cotonnier et du maïs, uniquement sur le sol ferrallitique (ferralsol) à Balla. Bien que statistiquement équivalents au témoin non amendé, les accroissements de rendement par les amendements sur le sol ferrugineux (lixisol) et le sol brun eutrophe (cambisol) atteignent, respectivement, 105 et 198 kg ha⁻¹ de coton graine en première année, contre 167 et 133 kg ha⁻¹ de maïs grain, en deuxième année.

Sur les trois types de sol, les amendements ont amélioré les rendements, aussi bien en première année sur le coton qu'en deuxième année sur le maïs. L'efficacité de la dolomie et du Burkina phosphate est comparable à celle du compost, qui semble mieux se comporter sur l'ensemble des sols. D'une manière générale, sur ces sols acides, exposés à l'acidification, les amendements n'ont pas amélioré la nutrition minérale des cultures, mais, en revanche, ils ont favorisé un accroissement des rendements.

5.3. Effets des amendements sur les bilans culturaux et sur l'acidification du sol

L'exportation des résidus de récolte, qui est une pratique paysanne largement répandue, entraîne des pertes d'éléments minéraux qu'il faut quantifier pour le calcul du bilan cultural.

5.3.1. Exportations d'éléments minéraux par les résidus de récolte

Il ressort du tableau XXXVIII, que les amendements apportés influencent les exportations minérales par les résidus de récolte.

Tableau XXXVIII. Evaluation des exportations minérales par les tiges des cultures à Farako-bâ

Cultures/années	Traitements	kg ha ⁻¹			
		N	P	K	S
Coton (2004)	T1	18,90 ^a	1,80 ^a	20,20 ^b	3,60 ^a
	T2	18,00 ^a	2,40 ^a	28,60 ^a	3,70 ^a
	T3	12,70 ^b	2,00 ^a	22,40 ^b	3,60 ^a
	T4	19,40 ^a	2,40 ^a	23,00 ^b	3,06 ^a
	Probabilité (5%)	0,021	0,712	0,037	0,894
Maïs (2005)	T1	30,20 ^{ab}	4,20 ^a	38,10 ^a	1,60 ^{ab}
	T2	25,80 ^{ab}	3,80 ^a	49,40 ^a	1,50 ^b
	T3	23,20 ^b	2,80 ^a	40,90 ^a	1,70 ^{ab}
	T4	33,70 ^a	3,80 ^a	39,40 ^a	2,40 ^a
	Probabilité (5%)	0,023	0,421	0,299	0,048
Sorgho (2006)	T1	99,15 ^a	8,47 ^a	36,46 ^a	3,01 ^a
	T2	74,29 ^a	9,84 ^a	37,25 ^a	2,75 ^a
	T3	87,23 ^a	8,28 ^a	50,92 ^a	3,07 ^a
	T4	93,30 ^a	8,60 ^a	49,81 ^a	3,27 ^a
	Probabilité (5%)	0,390	0,895	0,100	0,408

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm, T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm. Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher.

Comparé au sol témoin, l'apport de la dolomie a augmenté les quantités d'azote, de phosphore et de potassium exportés par les tiges de cotonnier. La dolomie a aussi accru les exportations d'azote, de potassium et de soufre par les tiges de maïs en deuxième année, ainsi que les exportations de potassium et de soufre par les tiges de sorgho (Tableau XXXVIII).

Sur le sol amendé par le Burkina phosphate, l'exportation d'azote par les tiges de cotonnier (12,7 kg ha⁻¹) a baissé de façon significative, par rapport à celle observée sur le sol témoin (18,9 kg ha⁻¹). Les exportations d'azote et de phosphore par les tiges de maïs et de sorgho ont été réduites, avec l'apport de Burkina phosphate qui, en revanche, a accru les exportations de potassium et de soufre.

Comparativement au sol témoin non amendé, le compost a augmenté les exportations de potassium, respectivement, de 42 et 30% par les tiges de cotonnier et de maïs. Les quantités de potassium exporté par les tiges de cotonnier, de maïs et de sorgho sur le sol témoin sont inférieures à celles exportées sur les sols amendés.

Les quantités de phosphore et de soufre exportés par les tiges de cotonnier, de maïs et de sorgho sont négligeables par rapport à celles de l'azote et du potassium. L'accroissement des exportations d'éléments minéraux à travers le prélèvement hors du champ des tiges de cotonnier, de maïs et de sorgho, dans les sols amendés, apparaît comme un facteur aggravant les risques d'acidification du sol.

5.3.2. Evaluation des exportations minérales par le coton graine et les grains de maïs et de sorgho

Les apports de compost ou de dolomie, associés à la fumure minérale, ont entraîné des exportations plus importantes d'azote, de phosphore et de potassium par les productions de coton graine, de maïs grain et de sorgho grain (Tableau XXXIX).

Tableau XXXIX. Exportations minérales par le coton graine et les grains de maïs et de sorgho à Farako-bâ

Cultures/années	Traitements	N	P	K	S
		kg ha ⁻¹			
Coton (2004)	T1	28,60 ^a	11,00 ^a	12,00 ^b	3,70 ^a
	T2	37,80 ^a	13,00 ^a	18,40 ^a	4,50 ^a
	T3	26,20 ^a	9,50 ^a	15,00 ^{ab}	3,70 ^a
	T4	31,60 ^a	12,10 ^a	16,00 ^{ab}	3,80 ^a
	Probabilité (5%)	0,512	0,471	0,039	0,431
Maïs (2005)	T1	61,60 ^b	5,00 ^a	33,70 ^a	3,30 ^a
	T2	70,30 ^a	5,20 ^a	33,90 ^a	3,60 ^a
	T3	62,60 ^{ab}	4,50 ^a	30,80 ^a	3,00 ^a
	T4	67,80 ^{ab}	5,00 ^a	35,30 ^a	3,10 ^a
	Probabilité (5%)	0,046	0,559	0,529	0,608
Sorgho (2006)	T1	32,03 ^b	12,27 ^b	23,91 ^b	1,45 ^b
	T2	36,80 ^{ab}	14,10 ^{ab}	27,46 ^{ab}	1,67 ^{ab}
	T3	36,25 ^{ab}	13,89 ^{ab}	27,05 ^{ab}	1,64 ^{ab}
	T4	39,61 ^a	15,18 ^a	29,56 ^a	1,79 ^a
	Probabilité (5%)	0,020	0,017	0,024	0,032

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm, T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm. Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher.

Les quantités de soufre et de phosphore prélevés dans le sol par les récoltes n'ont pas été influencées par les fumures appliquées, ni en première année sur le coton, ni en deuxième

année sur le maïs. En troisième année, les exportations de phosphore et de soufre par le sorgho ont été améliorées sur les sols amendés. Ces exportations ont d'ailleurs augmenté de façon significative avec l'amendement par la dolomie, atteignant, respectivement, 15,18 et 1,79 kg ha⁻¹ pour le phosphore et le soufre. Les quantités d'azote (26,2 kg ha⁻¹) et de phosphore (9,2 kg ha⁻¹) exportés par le coton graine sur le sol amendé par le Burkina phosphate ont été inférieures à celles du sol témoin non amendé (Tableau XXXIX). Excepté le Burkina phosphate, les amendements en compost et en dolomie ont contribué à augmenter les quantités d'azote, de phosphore, de potassium et de soufre prélevés dans le sol par les productions de coton graine, de maïs et sorgho grain, par rapport au témoin.

Pour tous les traitements confondus, l'analyse cumulée des exportations minérales par les trois cultures est présentée dans le tableau XL.

Tableau XL. Exportations cumulées d'éléments minéraux dans une rotation triennale coton-maïs-sorgho (2004-2006)

Exportations	N	P	K	S
	kg ha ⁻¹			
Coton				
Exportation par le coton graine	31,07	11,42	15,35	3,95
Exportation par les tiges de cotonnier	17,27	2,14	23,54	3,60
Exportation totale par le coton	48,34	13,55	38,90	7,56
Exportation par les tiges (%)	36	16	61	48
Maïs				
Exportation par les grains de maïs	65,56	4,92	33,43	3,23
Exportation par les tiges de maïs	28,24	3,65	41,95	1,80
Exportation totale par le maïs	93,79	8,58	75,37	5,03
Exportation par les tiges (%)	30	43	56	36
Sorgho				
Exportation par les grains de sorgho	36,17	13,86	27,00	1,64
Exportation par les tiges de sorgho	88,49	8,80	43,61	3,02
Exportation totales par le sorgho	124,67	22,66	70,61	4,66
Exportation par les tiges(%)	71	39	62	65
Rotation coton - maïs - sorgho				
Exportation par les récoltes	132,80	30,20	75,77	8,82
Exportation par les tiges	134,00	14,59	109,10	8,43
Exportation totale de la rotation	266,80	44,79	184,88	17,25
Exportation totale par les tiges (%)	50	33	59	49

Il ressort que sur les exportations totales par la culture du coton, 36% de l'azote, 48% du soufre et 61% du potassium sont exportés par les tiges de cotonnier. En ce qui concerne le maïs, 30% de l'azote, 36% du soufre, 43% du phosphore et 56% du potassium, ont été prélevés par les tiges. Les tiges de sorgho ont occasionné, en valeur relative, les exportations d'éléments minéraux les plus importantes, à savoir : 71% d'azote, 62% de potassium, 65% de soufre et 39% de phosphore. Dans une rotation coton-maïs-sorgho, les exportations d'éléments minéraux par les résidus des cultures en trois années sont importantes et atteignent 50% pour l'azote, le soufre, contre 59% pour le potassium. Les exportations de phosphore estimées à 33% ont été relativement faibles. Les pratiques culturales basées sur l'enlèvement des résidus de récolte du champ, entraînent des pertes d'éléments minéraux comparables, voire supérieures, aux pertes occasionnées par les récoltes (coton graine, grains de maïs et de sorgho), et conduisent de ce fait à l'appauvrissement, puis à l'acidification du sol.

5.3.3. Bilans culturaux d'une rotation coton-maïs-sorgho et acidification du sol

En considérant les éléments minéraux apportés au sol par les fumures d'une part, et les exportations par les cultures d'autre part, les bilans culturaux pour le phosphore et le soufre sont positifs pour les sols amendés et le sol témoin (Tableau XLI).

Tableau XLI. Bilans culturaux en azote, en phosphore, en potassium et en soufre d'une rotation triennale coton-maïs-sorgho (Farako-bâ)

Eléments Minéraux	Composantes du bilan	T1	T2	T3	T4
		kg ha ⁻¹			
Azote (N)	Apports par les fumures	132,0	210,6	132,0	132,0
	Exportations totales en 3 ans par le coton, le maïs et le sorgho	270,6	262,9	248,2	285,5
	Bilan en N	- 138,6	- 52,3	- 116,2	- 153,5
Phosphore (P ₂ O ₅)	Apports par les fumures	103,5	121,5	178,5	103,5
	Exportations totales en 3 ans par le coton, le maïs et le sorgho	42,7	48,2	41,0	47,1
	Bilan en P	+ 60,8	+ 73,3	+ 137,5	+ 56,4
Potassium (K ₂ O)	Apports par les fumures	63,0	135,0	63,0	63,0
	Exportations totales en 3 ans par le coton, le maïs et le sorgho	164,3	195,0	187,1	193,1
	Bilan en K	- 101,3	- 60,0	- 124,1	- 130,1
Soufre (S)	Apports par les fumures	27,0	46,2	27,0	27,0
	Exportations totales en 3 ans par le coton, le maïs et le sorgho	16,7	17,6	16,7	18,0
	Bilan en S	+ 10,3	+ 28,6	+ 10,3	+ 9,0

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm, T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm.

Après trois années d'application des fumures minérales sur les sols amendés et le sol témoin, les bilans culturaux révèlent des excédents de 56,4 à 137,5 kg ha⁻¹ de phosphore et de 9 à 28,6 kg ha⁻¹ de soufre (Tableau XLI). Au niveau du sol amendé en phosphate naturel tricalcique, ce bilan phosphaté excédentaire était 1,9 à 2,4 fois plus élevé que ceux des autres sols amendés ou non. Les bilans culturaux après trois années de culture se sont révélés déficitaires pour l'azote et le potassium, et ce, quelles que soient les fumures appliquées. Autrement dit, le témoin non amendé et les amendements apportés occasionnent des pertes d'azote et de potassium qui appauvrissent et acidifient le sol. L'apport de compost a engendré sur les bilans culturaux, des déficits de 52,3 kg ha⁻¹ d'azote et de 60 kg ha⁻¹ de potassium. Sur le sol témoin non amendé et les autres sols amendés par la dolomie ou par le Burkina phosphate, les déficits en azote et en potassium étaient 2 fois plus importants. Les sols amendés par le Burkina phosphate et la dolomie se sont davantage appauvris en azote et en potassium par rapport au sol amendé par le compost (Tableau XLI). Les apports de Burkina phosphate ou de dolomie n'ont pas réduit les déficits en azote et en potassium par rapport au sol témoin non amendé. En revanche, le compost, utilisé à 6 t ha⁻¹, a permis de réduire le déficit en potassium, qui a été inférieur à celui du sol témoin.

En dépit des amendements appliqués pour neutraliser l'acidification, avec l'exportation des résidus de récolte, l'on enregistre, au bout de trois années d'une rotation coton-maïs-sorgho, des pertes en azote et en potassium qui appauvrissent le complexe adsorbant en NH₄⁺ et en K⁺, donc exposent le sol au processus d'acidification.

5.4. Effet des amendements sur les propriétés chimiques des sols sur les sites en milieu paysan

5.4.1. Efficacité des amendements sur l'acidité du sol brun eutrophe

Le tableau XLII présente les caractéristiques chimiques initiales du sol avant les apports d'amendement en 2006 et leur évolution après deux années de mise en culture, en 2007. L'effet des amendements est peu perceptible sur les caractéristiques chimiques du sol, en particulier sur son acidité. Les amendements ont amélioré les teneurs en P assimilable, qui sont passées de 1,46 mg kg⁻¹ à 2,47 et 3,62 mg kg⁻¹, avec, respectivement, les apports du compost et du phosphate naturel. L'apport de la dolomie a eu un effet favorable sur le pH du sol et a occasionné une légère amélioration de la CEC, qui est passée de 22,95 cmol⁺ kg⁻¹ à 24,02 cmol⁺ kg⁻¹. Les valeurs de pH eau supérieures à 6 et celles de l'acidité d'échange qui sont négligeables, ont été peu influencées par les amendements.

Tableau XLII. Evolution des caractéristiques chimiques du sol brun eutrophe (cambisol) de Boni sur 0-20 cm

Caractéristiques	2006	2007			
		T1	T2	T3	T4
C total (g kg ⁻¹)	9,20	10,3	10,0	10,3	10,5
N total (g kg ⁻¹)	0,77	0,89	0,83	0,77	0,94
C/N	12	12	12	13	11
P total (mg kg ⁻¹)	179,6	179,6	164,6	194,5	179,6
P assimilable (mg kg ⁻¹)	1,46	1,75	2,47	3,64	2,62
SBE (cmol ⁺ kg ⁻¹)	17,79	17,46	14,93	17,24	18,20
C.E.C (cmol ⁺ kg ⁻¹)	22,95	22,52	19,23	22,83	24,02
Taux de saturation en bases (%)	78	78	78	76	76
Acidité d'échange (Al ³⁺ + H ⁺) (cmol ⁺ kg ⁻¹)	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10
pH eau	6,66	6,78	6,54	6,73	6,78
pH KCl	5,66	5,40	5,28	5,76	5,40
ΔpH	1,00	1,38	1,26	0,97	1,38

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm, T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm.

5.4.2. Efficacité des amendements sur l'acidité du sol ferrugineux

Après deux années de culture sur le sol ferrugineux (lixisol), les caractéristiques chimiques du sol ont été peu influencées par les amendements (Tableau XLIII).

Tableau XLIII. Evolution des caractéristiques chimiques du sol ferrugineux (lixisol) de Dohoun sur 0-20 cm

Caractéristiques	2006	2007			
		T1	T2	T3	T4
C total (g kg ⁻¹)	11,90	10,0	12,3	13,1	10,7
N total (g kg ⁻¹)	0,77	0,67	0,94	0,83	0,61
C/N	15	15	13	16	18
P total (mg kg ⁻¹)	164,6	149,6	179,6	179,6	134,7
P assimilable (mg kg ⁻¹)	3,78	2,47	2,77	3,49	2,18
SBE (cmol ⁺ kg ⁻¹)	9,73	7,04	7,83	8,42	6,24
C.E.C (cmol ⁺ kg ⁻¹)	13,76	9,66	10,58	11,38	8,23
Taux de saturation en bases (%)	71	73	74	74	76
Acidité d'échange (Al ³⁺ + H ⁺) (cmol ⁺ kg ⁻¹)	0,10	0,15	0,10	0,10	0,10
pH eau	6,46	6,28	6,51	6,25	6,33
pH KCl	5,81	5,21	5,74	5,41	5,20
ΔpH	0,65	1,07	0,77	0,84	1,13

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm, T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm.

La teneur en carbone a baissé de 11,90 à 10,0 g kg⁻¹ sur le sol témoin, et de 11,90 à 10,7 g kg⁻¹ sur le sol amendé par la dolomie. Avec les apports de compost et de phosphate

naturel, il s'est produit une amélioration de la teneur en P total qui a baissé sur le sol non amendé et sur celui amendé en dolomie. Les teneurs en P assimilable ont, quant à elles, baissé sur toutes les parcelles, amendées ou non. Les réserves en bases échangeables ont légèrement baissé, augmentant ainsi, le risque d'acidification du sol. Contrairement au sol brun eutrophe (cambisol), la SBE a régressé de 9,73 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ à 6,24 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ sur le sol amendé par la dolomie. La CEC a, dans l'ensemble, fortement baissé après deux années de culture. Les pH eau et pH KCl allant, respectivement, de 6,2 à 6,5 et de 5 à 5,8, n'ont pas été influencés, bien que les niveaux de l'acidité d'échange de ce sol ne soient pas négligeables.

5.4.3. Efficacité des amendements sur l'acidité du sol ferrallitique (ferralsol)

Les teneurs en matière organique sur le sol ferrallitique (ferralsol) semblent baisser après deux années de culture, même avec l'apport de compost (Tableau XLIV).

Tableau XLIV. Evolution des caractéristiques chimiques du sol ferrallitique (ferralsol) de Balla sur 0-20 cm

Caractéristiques	2006	2007			
		T1	T2	T3	T4
C total (g kg^{-1})	5,10	4,6	4,2	4,3	5,0
N total (g kg^{-1})	0,33	0,28	0,28	0,28	0,33
C/N	15	16	15	15	15
P total (mg kg^{-1})	89,8	89,8	104,7	89,8	89,8
P assimilable (mg kg^{-1})	7,71	4,51	5,09	4,80	3,78
SBE ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)	1,64	2,20	1,90	1,80	1,88
C.E.C ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)	2,92	3,13	3,20	3,39	3,55
Taux de saturation en bases (%)	56	70	59	53	53
Acidité d'échange ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)	0,13	0,20	0,15	0,15	0,25
pH eau	6,15	6,12	6,35	6,01	6,03
pH KCl	5,17	4,72	4,84	4,88	4,56
ΔpH	0,98	1,4	1,51	1,13	1,47

T1 : 150 kg ha^{-1} de NPKSB + 50 kg ha^{-1} d'urée (Fm), T2 : 6 t ha^{-1} de compost + Fm, T3 : 0,3 t ha^{-1} de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha^{-1} de dolomie + Fm.

Les faibles réserves en P total (89,8 mg kg^{-1}) sont demeurées stables après deux années de mise en culture des terres, alors que le P assimilable, dont la teneur était relativement élevée, a chuté sur tous les sols amendés et sur le sol témoin. Il s'est produit, avec les amendements, une amélioration de la SBE de 1,64 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ à 2,20 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ et de la CEC de 2,92 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ à plus de 3 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$. Le pH eau et le pH KCl ont été peu influencés, alors que l'acidité d'échange (0,15 à 0,25 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$) a légèrement augmenté (Tableau XLIV).

Les amendements apportés sur le sol brun eutrophe (cambisol), le sol ferrugineux (lixisol) et le sol ferrallitique (ferralsol), en milieu paysan, ont peu influencé les propriétés chimiques du sol après seulement deux années de mise en culture. Le compost, le phosphate naturel et la dolomie ont tendance à améliorer la SBE, la CEC et le pH sur le sol brun eutrophe (cambisol) et le sol ferrallitique (ferralsol). En revanche, sur les sols ferrugineux (lixisols), la neutralisation de l'acidité par les amendements est peu perceptible.

5.5. Effets des amendements sur l'activité biologique et l'acidification des sols

L'acidité agit sur la répartition et l'activité des micro-organismes et, partant, sur la minéralisation des matières organiques assurant la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes (Wei *et al.*, 2006). Parmi les principaux processus conduisant à l'acidité dans les sols, la production d'acides organiques et ou d'acide nitrique par les microorganismes du sol, ainsi que la respiration de ces derniers sont très importants.

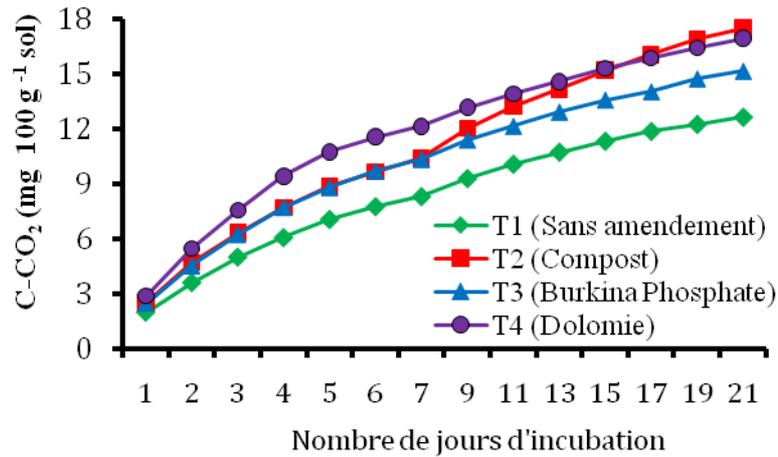
5.5.1. Effets des amendements sur l'activité respiratoire des sols du site en station de recherche

En station de recherche sur le site de Farako-bâ, l'activité respiratoire du sol a été mesurée en première année à 1, 50 et 120 jours après l'apport des amendements (Figure 13).

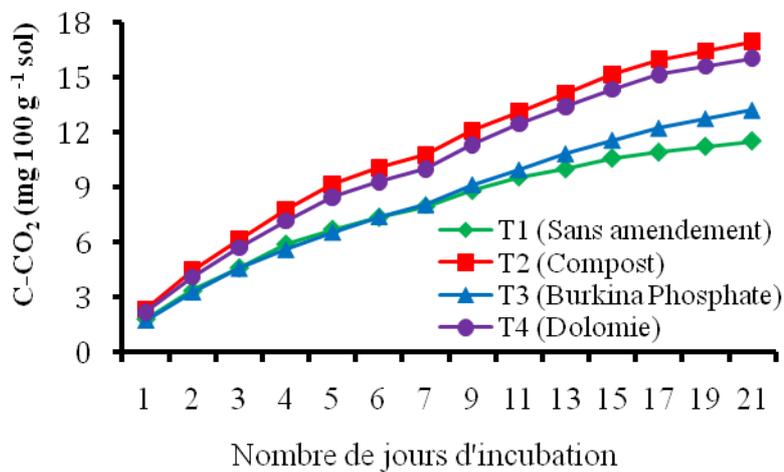
Dans les échantillons de sols prélevés à seulement 1 jour après les amendements, le cumul de CO₂ dégagé dans le sol amendé en phosphate naturel (15,13 mg de C-CO₂ 100 g⁻¹ de sol) était inférieur à ceux des sols amendés en compost et dolomie (Figure 13 a).

En ce qui concerne les échantillons de sols prélevés 50 jours après les amendements, on a noté que l'activité respiratoire était plus importante pour le sol amendé en compost, suivi du sol amendé en dolomie, puis du sol amendé en phosphate naturel (Figure 13 b).

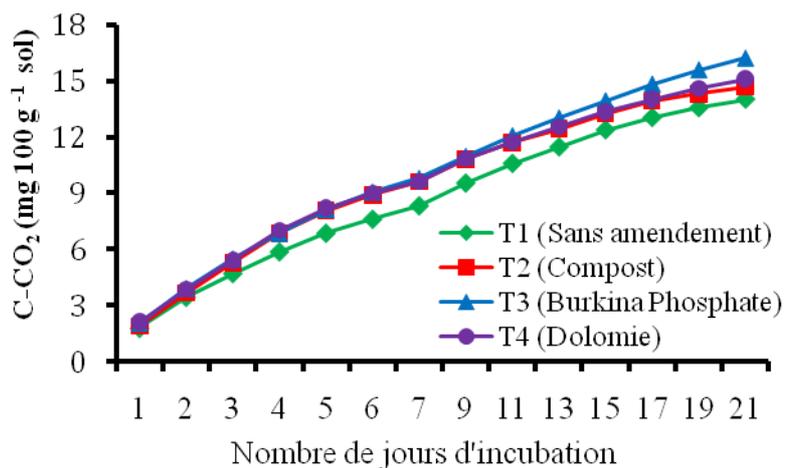
En revanche, dans les échantillons de sols prélevés 120 jours après les amendements, le cumul de CO₂ le plus important a été observé dans le sol amendé en phosphate naturel (Figure 13 c). Par rapport au sol témoin non amendé, les apports d'amendements ont permis de relever légèrement le cumul de CO₂ dégagé, et, partant, l'activité respiratoire des sols, qu'ils soient prélevés à 1, 50 ou 120 jours après les amendements.



a) Sols prélevés 1 jour après l'apport des amendements



b) Sols prélevés 50 jours après l'apport des amendements



c) Sols prélevés 120 jours après l'apport des amendements

Figure 13. Evolution cumulée de C-CO₂ (mg 100 g⁻¹ de sol) sur les sols prélevés a) 1 jour, b) 50 jours et c) 120 jours après les apports d'amendements.

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm, T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm.

5.5.2. Effets des amendements sur l'activité biologique des sols sous culture attelée des sites en milieu paysan

L'activité biologique des sols sous culture attelée issus des sites en milieu paysan, a été évaluée à la récolte, soit deux années après les amendements.

5.5.2.1. Evolution du cumul de C-CO₂ dégagé

• sol brun eutrophe (cambisol)

Sur le sol brun eutrophe (cambisol), à l'exception de l'amendement en phosphate naturel dont les dégagements cumulés de C-CO₂ sont plus élevés (65,71 mg de C 100 g⁻¹ de sol), l'activité respiratoire avec les amendements en compost ou en dolomie a été inférieure à celle du témoin non amendé (Figure 14).

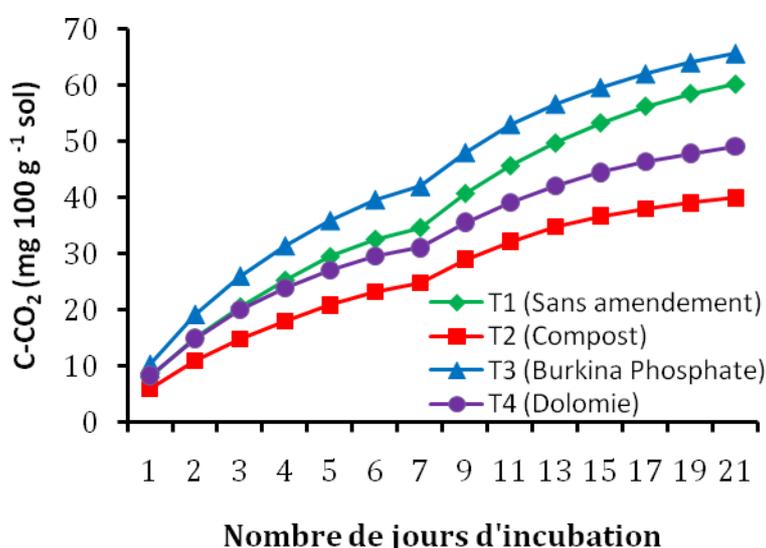


Figure 14. Evolution du cumul de C-CO₂ dégagé sur le sol brun (cambisol) en fonction des amendements (site de Boni).

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm

La plus faible activité respiratoire a été observée avec le compost, pour un dégagement cumulé de 39,97 mg de C 100 g⁻¹ de sol après 21 jours d'incubation. L'activité respiratoire du sol brun eutrophe (cambisol) est affectée par les amendements en compost et en dolomie, deux années après leur application (Figure 14).

• Sol ferrugineux (lixisol)

L'activité respiratoire la plus importante sur le sol ferrugineux (lixisol) a été observée avec l'amendement en compost, dont le dégagement cumulé de C-CO₂ est de 67,69 mg C 100 g⁻¹ de sol (Figure 15). En revanche, l'activité respiratoire a été plus faible avec la dolomie et le témoin non amendé, dont les dégagements de C-CO₂ sont équivalents. Il a été observé, avec

le phosphate naturel, une activité respiratoire intermédiaire avec un dégagement cumulé de C-CO₂ de 61,78 mg de C 100 g⁻¹ de sol. Sur le sol ferrugineux (lixisol), l'activité respiratoire demeure plus importante, deux années après l'apport du compost et du phosphate naturel.

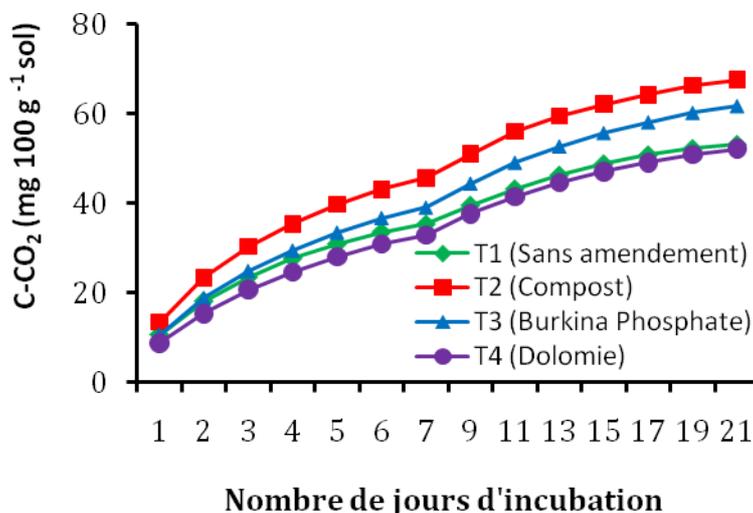


Figure 15. Evolution du cumul de C-CO₂ dégagé sur le sol ferrugineux (lixisol) en fonction des amendements (site de Dohoun).

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm

• Sol ferrallitique (ferralsol)

Le dégagement journalier de C-CO₂ mesuré dans le sol ferrallitique (ferralsol) de Balla est présenté par la figure 16.

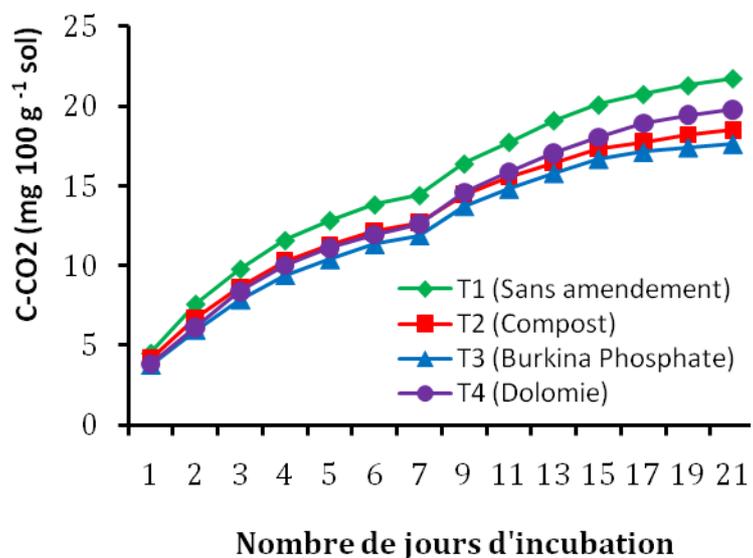


Figure 16. Evolution du cumul de C-CO₂ dégagé sur le sol ferrallitique (ferralsol) en fonction des amendements (site de Balla).

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm

Le cumul de C-CO₂ dégagé du sol témoin non amendé (21,74 mg de C 100 g⁻¹ de sol) est supérieur à celui du sol amendé en compost, en phosphate naturel ou en dolomie. L'activité respiratoire a été plus faible avec le phosphate naturel, suivi du compost et de la dolomie, avec des dégagements cumulés de C-CO₂ respectifs de 18,48 et 19,76 mg de C 100 g⁻¹ de sol. Par rapport au témoin non amendé, il a été observé sur les sols amendés, une plus faible activité respiratoire deux années après l'apport des amendements sur le sol ferrallitique (Figure 16).

De façon générale, il ressort que l'intensité de l'activité respiratoire est liée au type de sol. Elle est plus faible sur le sol ferrallitique (ferralsol) (cumul de C-CO₂ de 17,64 à 21,74 mg de C 100 g⁻¹ de sol) que sur le sol brun eutrophe (cambisol) et le sol ferrugineux (lixisol), avec des dégagements cumulés de C-CO₂ respectifs, de 65,71 et 67,69 mg de C 100 g⁻¹ de sol. Deux années après leur application, le compost et la dolomie réduisent l'activité respiratoire sur le sol ferrallitique (ferralsol) et le sol brun eutrophe (cambisol). En revanche, sur le sol ferrugineux (lixisol), des dégagements cumulés de C-CO₂ plus importants sont obtenus avec le compost et le phosphate naturel.

5.5.2.2. Evolution de la biomasse microbienne des sols

La biomasse microbienne est la fraction labile et active de la matière organique qui est significativement influencée ($p < 0,0001$) par les types de sol (Tableau XLV).

Tableau XLV. Evolution du carbone de la biomasse microbienne en 2007

Traitements	Sol brun eutrophe	Sol ferrugineux	Sol ferrallitique	Moyenne
	(cambisol) Boni	(lixisol) Dohoun	(ferralsol) Balla	
mg C 100 g ⁻¹ de sol				
T1	36,76 ^b	33,80 ^c	12,16 ^a	27,57 ^d
T2	32,28 ^c	52,94 ^a	9,39 ^b	31,54 ^b
T3	41,05 ^a	50,89 ^a	10,64 ^{ab}	34,19 ^a
T4	39,89 ^a	37,92 ^b	10,11 ^{ab}	29,30 ^c
Probabilité (5%)				
Traitements	< 0,0001	< 0,0001	0,039	< 0,0001
Types de sol	< 0,0001			

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm, T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm. Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher.

Deux années après l'apport du phosphate naturel et de la dolomie sur le sol brun eutrophe (cambisol), la biomasse microbienne est améliorée de façon significative par rapport au témoin non amendé, qui est significativement supérieur au compost. Comparativement au témoin non amendé, les amendements (compost, phosphate naturel et dolomie) ont amélioré

de façon significative le carbone de la biomasse microbienne sur le sol ferrugineux (lixisol) de Dohoun, au contraire du sol ferrallitique (ferralsol).

5.5.2.3. Effets des amendements sur la minéralisation du carbone

Sur les trois types de sol, la minéralisation du carbone a été influencée de façon significative par les traitements (Tableau XLVI).

Tableau XLVI. Minéralisation du carbone en 2007

Traitements	Sol brun eutrophe (cambisol) Boni	Sol ferrugineux (lixisol) Dohoun	Sol ferrallitique (ferralsol) Balla	Moyenne
	mg C 100 g ⁻¹ de sol			
T1	51,74 ^b	47,89 ^c	19,78 ^a	39,80 ^b
T2	36,12 ^d	61,18 ^a	16,87 ^c	38,05 ^c
T3	58,50 ^a	54,62 ^b	16,30 ^d	43,14 ^a
T4	43,56 ^c	46,24 ^d	17,64 ^b	35,81 ^d
Probabilité (5%)				
Traitements	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Types de sol	< 0,0001			

T1 : 150 kg ha⁻¹ de NPKSB + 50 kg ha⁻¹ d'urée (Fm), T2 : 6 t ha⁻¹ de compost + Fm, T3 : 0,3 t ha⁻¹ de Burkina phosphate + Fm, T4 : 1,5 t ha⁻¹ de dolomie + Fm. Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher.

Pour les quantités de carbone minéralisé, l'amendement en phosphate naturel sur le sol brun eutrophe (cambisol) et l'apport de compost au sol ferrugineux (lixisol) ont été significativement supérieurs aux autres traitements. Par contre, sur le sol ferrallitique (ferralsol), avec 19,78 mg C 100 g⁻¹ de sol sec, le carbone minéralisé du témoin non amendé est significativement supérieur à celui des autres traitements. Dans le sol brun eutrophe (cambisol) et le sol ferrugineux (lixisol), la minéralisation du carbone est significativement plus élevée que dans le sol ferrallitique (ferralsol).

L'activité respiratoire, la biomasse microbienne et la minéralisation de carbone ont été influencées de façon significative par le type de sols. L'effet des divers amendements est assez faible et varié sur l'activité respiratoire du sol. De façon globale, la minéralisation du carbone sur le sol témoin non amendé, est plus importante que sur les sols amendés en compost ou en dolomie.

5.6. Discussion

5.6.1. Efficacité des amendements sur la nutrition minérale

Les résultats obtenus montrent que la nutrition minérale des cultures a été bien satisfaite, en particulier sur le sol témoin où aucune correction de l'acidité n'a été opérée. Les

amendements appliqués pour corriger l'acidité du sol peuvent servir de nutriments pour les cultures (Elherradi *et al.*, 2003), mais ils n'ont pas amélioré de façon significative la nutrition minérale du cotonnier et du maïs en première et deuxième années après leur apport. La faible influence des fumures sur les teneurs en azote et en phosphore des cotonniers entre 30 et 60 jours, suggère que la disponibilité des nutriments n'a pas été améliorée par les amendements. Les travaux de Howard *et al.* (2001) ont montré que les teneurs en phosphore des pétioles et des limbes des cotonniers augmentaient avec la fertilisation phosphatée qui, par contre, entraîne la baisse des teneurs en potassium. Bado *et al.* (1993) et FAO (2004) ont évoqué l'effet réduit des phosphates naturels et de la dolomie par une solubilisation lente et une faible réactivité. Les teneurs en azote et en phosphore ont baissé entre 45 et 60 jours, alors que Braud (1987) a montré que les quantités d'éléments minéraux mobilisés par le cotonnier augmentaient constamment durant sa phase de croissance végétative. La diminution des teneurs en azote des cotonniers au 60^e jour sur les sols amendés et sur le sol témoin, serait liée à un phénomène de dilution dû à l'accroissement plus rapide du volume et du poids des feuilles que leur teneur en azote.

Les fonctions de production ont montré que la nutrition minérale du cotonnier était globalement satisfaite au 70^e jour pour tous les éléments nutritifs, à l'exception de l'azote. Sur les sols amendés en compost, en Burkina phosphate et en dolomie, la déficience en azote, plus marquée que sur le sol témoin, dénote un effet dépressif imputable selon Richard (1980) et Braud (1987), aux compétitions entre l'azote et le soufre ou entre l'azote et le phosphore. La nutrition potassique des cotonniers a été bonne dans l'ensemble et les teneurs en potassium étaient nettement supérieures à 6%, alors que le niveau critique pour cet élément, défini par Braud (1987), est de 4,4% à 75 jours après les semis.

Deux ans après l'apport des amendements, la nutrition minérale a été marquée par l'accroissement des teneurs en azote, en phosphore et en potassium du maïs au niveau du sol témoin non amendé, entre 60 et 80 jours après les semis. Cela suggère que sur les sols préalablement amendés, le transfert des éléments nutritifs des feuilles vers les épis du maïs a été plus optimal que sur le sol témoin non amendé. La forte mobilisation d'éléments minéraux se traduit par un appauvrissement des feuilles qui a, par conséquent, entraîné une baisse des teneurs en azote, en phosphore et en potassium du maïs au 80^e jour, sur les sols amendés (Koulibaly *et al.*, 2009a). Le compost et la dolomie ont permis une nutrition azotée correcte à 60 jours, à l'opposé du sol témoin et du sol amendé en Burkina phosphate, dont les nutriments sont déficients selon Loué (1984).

Trois ans après l'apport des amendements, la teneur en potassium du sorgho était significativement élevée dans le sol témoin, ce qui pourrait s'assimiler à un effet dépressif des

amendements initialement apportés. Dans une étude du diagnostic foliaire du sorgho, Jacquinet (1984) a montré que l'apport de doses élevées d'azote entraînait, par une augmentation de la matière sèche des plants, une diminution du taux de potassium dans les feuilles. En considérant les seuils critiques pour le sorgho, qui sont de 3,5 à 3,7% pour l'azote, 0,3 à 0,4% pour le phosphore, 1,7 à 2% pour le potassium (Morard, 1984), la nutrition du sorgho en troisième année était bien satisfaite en phosphore et en potassium, mais déficiente en azote sur les sols amendés et sur le sol témoin.

Comparativement aux sols amendés, les teneurs élevées en éléments minéraux des cultures sur le sol témoin, suggèrent un mauvais transfert des nutriments des feuilles vers les organes fructifères. Cela est imputable à l'acidité du sol ou à une plus faible production de matière sèche, qui se traduit par une concentration plus élevée des feuilles en nutriments.

5.6.2. Effets des fumures sur les rendements

Sur le site de Farako-bâ en station de recherche comme sur ceux en milieu paysan, l'amélioration des rendements des cultures met en exergue la nécessité et l'intérêt de procéder, en zone cotonnière, à des amendements pour accroître la production du coton, mais aussi des céréales. En station de recherche à Farako-bâ, après 20 années d'exploitation continue d'un sol dégradé et acide, les apports de compost, de phosphate naturel et de dolomie se révèlent incontournables pour améliorer les rendements. Cela confirme les travaux de Dridi et Toumi (1999) qui ont mis en évidence, sur des sols fortement acides, des augmentations sensibles de rendements après les apports d'amendements organiques et de dolomie. Les résultats que nous avons obtenus ont montré que le phosphate naturel n'a eu un effet significatif sur les rendements que trois ans après son application, à cause probablement, de sa lente solubilisation (FAO, 2004 ; Lompo *et al.*, 2009). Les effets à long terme des amendements calco-magnésiens et phosphatés demeurent les plus importants et recherchés, d'après Gascho et Parker (2001). Pour que le phosphate naturel puisse servir de source de phosphore et permette d'optimiser la croissance des plantes, il faut que ses conditions d'utilisation en application directe favorisent sa dissolution en fonction du pH du sol (FAO, 2004). En milieu paysan, la meilleure efficacité du phosphate naturel et de la dolomie, observée sur le site de Balla, semble liée à l'état de pauvreté, à celui de dégradation et, partant, d'acidification des sols, qui sont plus marquées sur ce sol ferrallitique (ferralsol) par rapport aux sols brun eutrophe (cambisol) et au sol ferrugineux (lixisol). L'augmentation des rendements des cultures par le compost résulterait de l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol par cet amendement organique (Tejada et Gonzalez, 2007). La

minéralisation des substrats organiques permet d'améliorer la disponibilité des nutriments dans le sol (Rajeswara, 2001 ; Vulllioud *et al.*, 2004 ; Rutunga et Neel, 2006), ce qui accroît la production.

Le compost et la dolomie ont entraîné des exportations d'éléments minéraux plus importantes que celles sur sol témoin non amendé. Les exportations minérales de N, P, K et S par le cotonnier, le maïs et le sorgho ont été plus importantes avec la dolomie et le compost, du fait d'une meilleure réponse du sol à ces amendements, qui se révèlent plus efficaces que le phosphate naturel (Koulibaly *et al.*, 2009 a). L'exportation des éléments minéraux par les parties aériennes des cultures est aussi importante que celle occasionnée par les récoltes elles-mêmes, ce qui montre la nécessité de restituer ces résidus au sol, pour éviter de l'épuiser rapidement.

Les bilans cultureux déficitaires pour l'azote et le potassium conduisent à un appauvrissement du sol en ces éléments et, partant, à son acidification. Le compost est l'amendement qui semble le mieux approprié pour une gestion durable de la fertilité du sol, puisqu'il réduit de moitié les déficits en azote et en potassium, ainsi que les risques d'acidification qui en résultent. Tout en confirmant les travaux de Traoré (1995), ces résultats montrent qu'en exportant du champ les résidus de récolte, l'apport des amendements n'empêche pas les pertes d'éléments minéraux qui appauvrissent le sol et conduisent par conséquent, à son acidification.

L'efficacité des amendements appliqués pour corriger l'acidité des sols en milieu paysan est difficilement appréciable après deux années de mise en culture des terres. Le suivi de l'évolution des caractéristiques chimiques des sols montre une tendance à la baisse du taux de matière organique sur le sol témoin et sur les sols amendés en phosphate naturel ou en dolomie, à cause probablement du fait que ces amendements n'ont pas d'effet sur le statut organique (Lompo *et al.*, 2009). Les trois types de sol qui ont des teneurs en phosphore total inférieures à 200 mg kg⁻¹ de sol, sont déficitaires en phosphore (Sédogo, 1993). L'apport de phosphate naturel n'a pas empêché la baisse des teneurs du sol aussi bien en P total qu'en P assimilable et ce, malgré les bilans phosphatés excédentaires mis en évidence. La baisse de la SBE et de la CEC amorcée, surtout sur le sol ferrugineux (lixisol) est révélatrice d'un début de dégradation chimique du sol et de son acidification, que confirment les bilans cultureux déficitaires en azote et en potassium. En revanche, l'amélioration de la SBE et de la CEC, observée deux ans après l'apport de dolomie sur le sol ferrallitique (ferralsol) désaturé et sur le sol brun eutrophe (cambisol) montre l'importance de cet amendement pour le complexe adsorbant et, partant, sur la réduction de l'acidité (Gascho et Parker, 2001). Sur ces sols faiblement acides, dont les pH et les teneurs en aluminium échangeable sont restés inchangés, les améliorations attendues de l'apport

de la dolomie et du phosphate naturel, ne sont pas perceptibles après seulement deux années (Meng *et al.*, 2004). Les taux d'aluminium échangeable sont nettement en deçà du seuil critique de toxicité aluminique sur le cotonnier, qui est de $0,22 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$ selon Rabeharisoa (2004). La baisse du taux de matière organique, de la SBE et de la CEC, observée sur les sols amendés en compost et en phosphate naturel est révélatrice de leur acidification progressive que la dolomie semble neutraliser.

5.6.3. Evolution de l'activité respiratoire du sol en station de recherche

L'activité biologique est un bon indicateur de la fertilité d'un sol, puisqu'elle permet de suivre la dynamique des processus de décomposition et de transformation de la matière organique (Somé *et al.*, 2007). Les résultats ont montré sur le sol ferrugineux (lixisol) de Farakobâ, un dégagement cumulé de C-CO₂ plus élevé dans les sols amendés que dans le sol témoin, ce qui présume une amélioration de l'activité respiratoire à 1, 50 et 120 jours, après l'apport des amendements. Cela confirme les travaux de Gunapala *et al.* (1998), qui ont noté une intense activité biologique dans le sol après un apport de fumure organique. A 50 jours après l'apport des amendements, le dégagement cumulé de C-CO₂ le plus important a été obtenu avec le compost, en raison d'une abondance bactérienne qui serait favorisée par la fraction labile de la matière organique du compost (Tokeshi *et al.*, 1997). L'activité respiratoire la plus importante dans le sol amendé en phosphate naturel à 120 jours après les amendements, témoigne de la poursuite du processus de dissolution de ce substrat (Koulibaly *et al.*, 2009b). Pour que le phosphate naturel puisse servir de source de phosphore et optimiser la croissance des plantes, il faut que les conditions de son utilisation en application directe favorisent sa dissolution en stimulant l'activité microbienne (Lompo *et al.*, 2009). L'amélioration de l'activité respiratoire dans les sols amendés en compost et en dolomie, et prélevés 120 jours après l'apport de ces amendements, suggère que ces substrats favorisent une prolifération des microorganismes décomposeurs du sol (Zougmore *et al.*, 2003) et de ce fait, influencent activement l'acidité du sol.

5.6.4. Evolution de l'activité biologique des sols issus des sites en milieu paysan

Les mesures biologiques effectuées sur le sol témoin et les sols amendés permettent de définir les critères les plus pertinents pour juger de leur état organique. D'après Zombré (2006), le potentiel d'activité biologique du sol dépend de la matière organique avec laquelle elle est en étroite corrélation. Le dégagement cumulé de C-CO₂ n'a pas permis de mettre en évidence l'effet résiduel des amendements sur l'activité respiratoire des sols, même si l'accroissement du cumul de C-CO₂ sur le sol ferrugineux (lixisol) est imputable au compost et au phosphate naturel, deux

années après leur application. D'après Chaussod (1996), l'activité respiratoire n'est pas dans ce cas un critère discriminant pour caractériser les traitements.

Selon Bouzaiane *et al.* (2002), c'est la dénaturation de la membrane cellulaire des micro-organismes du sol par le chloroforme qui libère le carbone organique. Pour le carbone de la biomasse microbienne, compartiment actif à renouvellement rapide, les valeurs sont de 3 à 4 fois plus faibles pour le sol ferrallitique (ferralsol) que le sol brun eutrophe (cambisol) et le sol ferrugineux (lixisol). Puisque l'activité biologique a comme support énergétique la matière organique (Chaussod, 1996), les plus faibles teneurs en carbone sur le sol ferrallitique (ferralsol) ont considérablement limité le développement des micro-organismes par rapport aux deux autres sols. Sur le sol ferrallitique (ferralsol), le carbone de la biomasse microbienne est plus faible, illustrant la faiblesse des entrées de carbone, mettant en évidence la dynamique d'appauvrissement du sol et de son acidification (Demoling *et al.*, 2007). Par rapport au sol témoin non amendé, la biomasse microbienne est améliorée dans les sols amendés, surtout dans les sols ferrugineux (lixisols) où l'apport de compost a un effet significatif. Cette amélioration de la teneur en carbone de la biomasse microbienne dans les sols amendés en compost pourrait s'expliquer par l'apport au sol de matière organique facilement décomposable (Manjaiah *et al.*, 2000). En ce qui concerne les sols amendés en phosphate naturel ou en dolomie, l'accroissement de la teneur en carbone de la biomasse microbienne suggère une prolifération microbienne, suivie d'une mobilisation du carbone, principale source d'énergie pour ces micro-organismes (Cleveland *et al.*, 2004 ; Demoling *et al.*, 2007). Les valeurs de la biomasse microbienne permettent d'apprécier l'évolution après l'apport des amendements dans les sols. Il existe un équilibre entre la taille et les besoins énergétiques de la macro-flore d'une part, et entre la taille et la biodisponibilité la matière organique, d'autre part (Zombré, 2006).

La détermination du carbone minéralisé est étroitement dépendante des composés organiques, des conditions de température et d'humidité lors de l'incubation (Chaussod et Nicolardot, 1982). La minéralisation du carbone est significativement supérieure dans le sol brun eutrophe (cambisol) et le sol ferrugineux (lixisol) plus riches en matière organique que le sol ferrallitique (ferralsol). Les amendements en compost et en phosphate naturel semblent stimuler la minéralisation du carbone, ce qui suggère qu'ils favorisent des conditions de prolifération bactérienne assurant cette minéralisation.

La minéralisation du carbone favorise, par la perte de matière organique, l'acidification du sol. Si 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, ainsi que de tous les facteurs pouvant les modifier. Le type de sol influence l'activité biologique, qui est plus intense dans les

sols ferrugineux (lixisol) et brun eutrophe (cambisol) plus riches en matière organique par rapport au sol ferrallitique (ferralsol) biologiquement peu actif et plus sensible à l'acidification.

Conclusion

Les amendements améliorent les rendements sans influencer la nutrition minérale des cultures, ni l'acidité du sol. En dépit de l'apport des amendements, l'accroissement des exportations d'éléments minéraux qui résulte de l'enlèvement des résidus de récolte hors du champ, expose les sols à l'acidification. Avec l'enlèvement des résidus de récolte hors du champ, les bilans culturaux sont partout déficitaires en azote et en potassium, ce qui induit l'appauvrissement du sol et son acidification. Les amendements ne suffisent pas à neutraliser la tendance à l'acidification du sol, qui s'observe après deux années de mise en culture, par une baisse des propriétés chimiques des sols. Ces amendements améliorent l'activité respiratoire, la biomasse microbienne et influencent la minéralisation du carbone de même que l'acidité du sol. Le compost est l'amendement permettant d'assurer le mieux le maintien de la fertilité des sols. Dans les conditions de culture, pour limiter la dégradation chimique et le risque d'acidification qui en découle, il est recommandé de restituer au sol les résidus de récolte.

Il ressort de cette étude que malgré les amendements calco-magnésiens, l'acidification du sol se poursuit à cause des pertes d'éléments minéraux qui sont aggravées par l'enlèvement des résidus de récolte hors du champ. Il importe donc, pour lutter de façon durable contre l'acidification, d'analyser les effets à long terme de la gestion rationnelle des résidus de récolte.

CHAPITRE 6. ETUDE DE L'EFFET DE LA GESTION DES RESIDUS DE RECOLTE SUR L'ACIDIFICATION DU SOL DANS UN SYSTEME DE ROTATION COTON-MAÏS-SORGHO

Le chapitre précédent a mis en relief les limites des amendements calco-magnésiens dont l'application n'empêche pas la tendance à l'acidification des sols, à cause de la mauvaise gestion des résidus de récolte.

Dans ce chapitre, pour lutter contre l'acidification, l'impact des modes de gestion extensive, semi-intensive et intensive des résidus de récolte, combinés à l'utilisation du phosphate naturel et des engrais minéraux, est analysé, à travers un essai de longue durée.

6.1. Effets de la gestion des résidus de récolte sur l'acidification du sol et la nutrition minérale

6.1.1. Effets de la gestion des résidus de récolte sur la nutrition minérale des cotonniers

Le suivi de la nutrition minérale du cotonnier, qui est une plante très sensible à l'acidification du sol, a été réalisé pendant 17 années, de 1982 à 1998.

Durant les 10 premières années, la nutrition des cotonniers en N, P, K et S a été satisfaite par la fumure minérale utilisée en gestion extensive des résidus de récolte et n'a pas été améliorée par les apports additionnels de compost ou de fumier (Figure 17).

Azote. L'évolution de la nutrition des cotonniers en azote a été marquée par trois phases : une nutrition optimale ($F(N) > 100$) au cours des quatre premières années (1982 à 1985), puis une bonne nutrition de 1986 à 1993 ($90 < F(N) < 100$), suivie d'une nutrition carencée de 1994 à 1996 ($41 < F(N) < 69$) (Figure 17 a). Cette carence a été observée en même temps qu'une forte baisse des teneurs des cotonniers en azote réduites à des valeurs de 1,96 à 2,03%, qui sont nettement inférieures au seuil critique de 3% (Tableau XXXXVII).

Phosphore. La nutrition en phosphore des cotonniers a été bonne pendant les 10 premières années ($F(P) > 90$) et s'est même améliorée de 1991 à 1998, période durant laquelle une nutrition optimale a été observée sur tous les traitements ($F(P) > 100$) (Figure 17 b). Les teneurs en phosphore des feuilles de cotonnier sont très variables en fonction des cycles de rotation, avec des valeurs allant de 0,3 à 0,65 %, à l'exception du deuxième cycle (1985 à 1987) où elles sont inférieures à 0,3% (Tableau XXXXVII).

Potassium. La nutrition des cotonniers en potassium a été bonne ($90 < F(K) < 100$) et relativement stable pendant plus de 12 années, sans être influencée par les traitements, en dépit de la baisse du pH du sol. Une carence potassique a été observée sur les cotonniers en 1994, après 13 années d'exploitation continue des terres ($F(K) < 80$) (Figure 17 c).

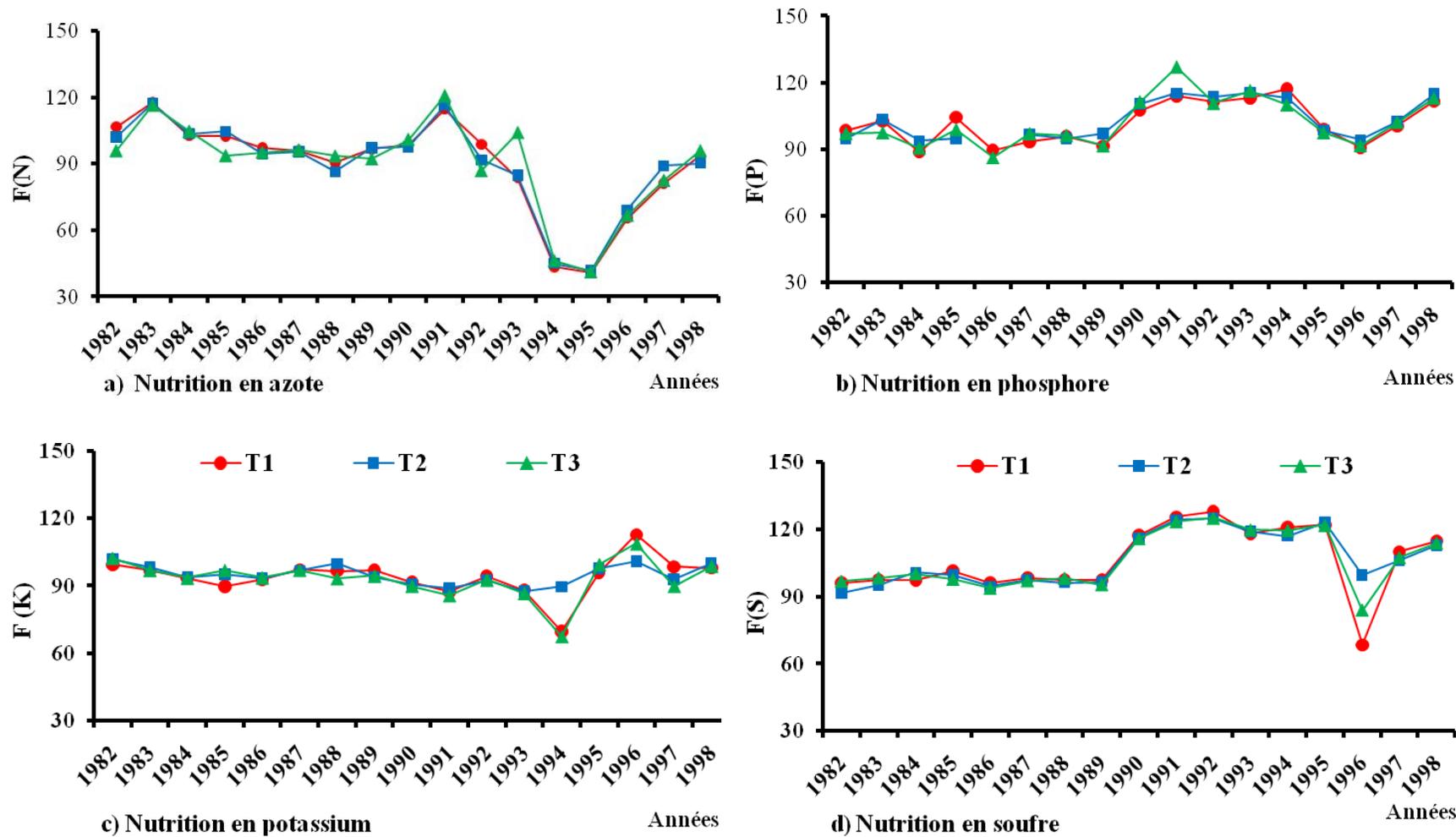


Figure 17. Evolution des fonctions de production des cotonniers en azote (a), phosphore (b), potassium (c) et soufre (d) selon les modes de gestion des résidus de récolte de 1982 à 1998.

T1 : gestion extensive des résidus + Fumure minérale - T2 : gestion semi-intensive des résidus + Fumure minérale + compost - T3 : gestion intensive des résidus + Fumure minérale + fumier.

Les teneurs des feuilles de cotonnier en potassium, fortement dépendantes de la pluviométrie, présentent des différences significatives ($p < 0,01$) entre les cycles de rotation (Tableau XLVII).

Tableau XLVII. Teneurs en éléments minéraux (N, P, K et S) des feuilles de cotonnier prélevées à 70 jours après les semis

Cycles de rotation	Traitements	N	P	K	S
		% (matière sèche)			
Cycle 1 (1982-1984)	T1	4,94 ± 0,34	0,32 ± 0,02	4,29 ± 0,45	0,41 ± 0,10
	T2	4,86 ± 0,35	0,35 ± 0,03	4,57 ± 0,56	0,37 ± 0,13
	T3	4,70 ± 0,60	0,31 ± 0,05	4,37 ± 0,87	0,45 ± 0,08
Cycle 2 (1985-1987)	T1	4,22 ± 0,34	0,28 ± 0,03	3,30 ± 0,73	0,53 ± 0,08
	T2	4,17 ± 0,37	0,27 ± 0,04	3,31 ± 0,49	0,50 ± 0,06
	T3	4,08 ± 0,62	0,28 ± 0,05	3,59 ± 0,67	0,45 ± 0,09
Cycle 3 (1988-1990)	T1	4,63 ± 0,49	0,32 ± 0,07	4,50 ± 0,85	0,69 ± 0,15
	T2	4,70 ± 0,73	0,33 ± 0,07	4,27 ± 0,28	0,60 ± 0,16
	T3	4,83 ± 0,50	0,32 ± 0,06	3,96 ± 0,41	0,64 ± 0,14
Cycle 4 (1991-1993)	T1	4,29 ± 0,36	0,45 ± 0,15	3,88 ± 0,31	0,89 ± 0,39
	T2	4,32 ± 0,33	0,45 ± 0,14	3,91 ± 0,37	0,89 ± 0,61
	T3	4,56 ± 0,46	0,43 ± 0,13	3,77 ± 0,32	0,88 ± 0,52
Cycle 5 (1994-1996)	T1	1,91 ± 0,50	0,59 ± 0,05	4,41 ± 0,91	1,00 ± 0,41
	T2	2,03 ± 0,55	0,61 ± 0,07	4,42 ± 0,33	0,94 ± 0,37
	T3	2,00 ± 0,56	0,58 ± 0,05	4,68 ± 1,30	0,81 ± 0,33
Cycle 6 (1997-1998)	T1	3,70 ± 0,09	0,54 ± 0,06	4,54 ± 0,18	0,46 ± 0,04
	T2	3,92 ± 0,14	0,65 ± 0,09	4,25 ± 0,75	0,50 ± 0,10
	T3	3,87 ± 0,10	0,61 ± 0,08	3,72 ± 0,61	0,47 ± 0,06
*Teneurs seuils		3 - 5	0,3	3 - 5	0,2 - 0,4
Analyses					
Cycles		< 0,0001(s)	< 0,0001 (s)	0,011 (s)	0,004 (s)
Traitements		0,771 (ns)	0,289 (ns)	0,644 (ns)	0,685 (ns)
Cycles x traitements		< 0,0001(s)	0,004 (s)	0,177 (ns)	0,027 (s)

T1 : gestion extensive des résidus + Fumure minérale - T2 : gestion semi-intensive des résidus + Fumure minérale + compost
T3 : gestion intensive des résidus + Fumure minérale + fumier. ns : non significatif, s : significatif. * Teneurs seuils : concentrations d'un élément nutritif dans les feuilles de cotonnier indiquant une bonne nutrition minérale de la plante.

Soufre. La nutrition des cotonniers en soufre a été relativement stable : bonne pendant huit années jusqu'en 1989 ($90 < F(S) < 100$), puis optimale à partir 1990. Il est à noter, après 15 années, l'apparition d'une déficience brutale en soufre ($80 < F(S) < 90$), uniquement sur les cotonniers témoins recevant la fumure minérale seule, en gestion extensive des résidus de récolte (Figure 17 d). Les teneurs en soufre comprises entre 0,37 et 1% indiquent une

nutrition correcte des cotonniers qui est jugée bonne selon Braud (1987), pour des valeurs comprises entre 0,2 et 0,4% (Tableau XLVII).

Calcium et magnésium. En 17 années, les traitements n'ont pas significativement influencé les teneurs des feuilles de cotonnier en calcium, qui varient de 1,15 à 2,52%, ni celles du magnésium, qui varient de 0,31 à 0,66%. Dans la mesure où les teneurs requises sont, respectivement, de 0,6% et 1,5% pour le magnésium et le calcium, on considère comme acceptable la nutrition en ces éléments, surtout à partir du troisième cycle de rotation, qui couvre la période allant de 1988 à 1990 (Tableau XLVIII).

Tableau XLVIII. Teneurs en éléments minéraux secondaires (Ca, Mg, Na, Cl et B) des feuilles de cotonnier prélevées à 70 jours après les semis.

Cycles de rotation	Traitements	Ca	Mg	Na	Cl	B
		% de matière sèche				mg kg ⁻¹
Cycle 1 (1982-1984)	T1	1,24 ± 0,19	0,42 ± 0,06	0,15 ± 0,09	1,77 ± 0,16	32,17 ± 9,11
	T2	1,15 ± 0,12	0,31 ± 0,09	0,13 ± 0,09	1,98 ± 0,17	39,33 ± 14,15
	T3	1,20 ± 0,17	0,34 ± 0,07	0,14 ± 0,11	1,57 ± 0,26	31,67 ± 10,97
Cycle 2 (1985-1987)	T1	1,26 ± 0,09	0,47 ± 0,09	0,06 ± 0,03	0,92 ± 0,13	32,83 ± 3,13
	T2	1,16 ± 0,04	0,40 ± 0,02	0,04 ± 0,01	0,82 ± 0,11	33,33 ± 4,62
	T3	1,19 ± 0,05	0,38 ± 0,02	0,04 ± 0,02	0,77 ± 0,23	35,00 ± 1,00
Cycle 3 (1988-1990)	T1	1,72 ± 0,15	0,46 ± 0,08	0,04 ± 0,02	1,04 ± 0,25	30,54 ± 8,94
	T2	1,65 ± 0,32	0,46 ± 0,15	0,04 ± 0,02	0,81 ± 0,24	31,51 ± 9,96
	T3	1,72 ± 0,13	0,53 ± 0,03	0,05 ± 0,02	0,73 ± 0,09	30,96 ± 10,45
Cycle 4 (1991-1993)	T1	1,76 ± 0,06	0,59 ± 0,06	0,06 ± 0,02	1,06 ± 0,35	32,67 ± 4,45
	T2	1,61 ± 0,08	0,51 ± 0,12	0,04 ± 0,02	0,97 ± 0,41	34,83 ± 9,19
	T3	1,68 ± 0,05	0,54 ± 0,06	0,04 ± 0,03	0,87 ± 0,35	32,33 ± 0,94
Cycle 5 (1994-1996)	T1	2,34 ± 0,29	0,52 ± 0,16	0,29 ± 0,11	0,93 ± 0,20	-
	T2	2,52 ± 0,41	0,43 ± 0,14	0,52 ± 0,27	0,94 ± 0,15	-
	T3	2,26 ± 0,08	0,66 ± 0,24	0,44 ± 0,19	1,45 ± 0,35	-
*Teneurs seuils		1,5	0,5-0,9	-	-	20-60

Analyses

Cycles	< 0,0001 (s)	0,001 (s)	0,008 (s)	< 0,0001 (s)	0,341 (ns)
Traitements	0,580 (ns)	0,195 (ns)	0,728 (ns)	0,098 (ns)	0,382 (ns)
Cycles x traitements	< 0,0001 (s)	0,011 (s)	0,001 (s)	< 0,0001 (s)	0,216 (ns)

- : valeur non déterminée, T1 : gestion extensive des résidus + Fumure minérale, T2 : gestion semi-intensive des résidus + Fumure minérale + compost, T3 : gestion intensive des résidus + Fumure minérale + fumier.

ns : non significatif, s : significatif. * Teneurs seuils : concentrations d'un élément nutritif dans les feuilles de cotonnier indiquant une bonne nutrition minérale de la plante.

Sodium et chlore. Les teneurs en sodium comprises entre 0,04 et 0,52% indiquent une assez bonne nutrition des cotonniers. De même, les teneurs en chlore comprises entre 0,73 et 1,98% et celles du bore, comprises entre 30,96 et 39,33 mg kg⁻¹, reflètent une nutrition minérale correcte des cotonniers.

Il ressort de ce qui précède que l'alimentation du cotonnier, fortement dépendante du pH du sol, n'a pas été affectée en 17 années d'exploitation des terres.

6.1.2. Effets de la gestion des résidus de récolte et des fumures sur les rendements des cultures

Les modes de gestion des résidus de récolte n'ont pas eu d'effets significatifs sur les rendements du coton et du maïs pendant 12 ans de culture, ni sur ceux du sorgho pendant 15 ans (Tableau XLIX).

Tableau XLIX. Evolution des rendements des cultures en fonction de la durée de mise en culture des terres et des modes de gestion des résidus de récolte

Durée de mise en culture des parcelles	Coton			Maïs			Sorgho		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
	kg ha ⁻¹								
3 ans (1982-1984)	1752 ^a	1583 ^a	1902 ^a	1486 ^a	1693 ^a	1650 ^a	1488 ^a	1410 ^a	1469 ^a
6 ans (1982-1987)	1660 ^a	1658 ^a	1800 ^a	1981 ^a	2276 ^a	2410 ^a	1398 ^a	1289 ^a	1509 ^a
9 ans (1982-1990)	1589 ^a	1609 ^a	1812 ^a	2121 ^a	2621 ^a	2738 ^a	1331 ^a	1439 ^a	1603 ^a
12 ans (1982-1993)	1477 ^a	1535 ^a	1702 ^a	1929 ^a	2632 ^a	2648 ^a	1203 ^a	1344 ^a	1518 ^a
15 ans (1982-1996)	1434 ^b	1569 ^{ab}	1689 ^a	1900 ^b	2661 ^{ab}	2693 ^a	1110 ^a	1258 ^a	1424 ^a
18 ans (1982-1999)	1393 ^b	1526 ^{ab}	1671 ^a	1759 ^b	2524 ^a	2638 ^a	1006 ^b	1198 ^{ab}	1390 ^a
21 ans (1982-2002)	1325 ^b	1476 ^{ab}	1606 ^a	1629 ^b	2358 ^a	2531 ^a	934 ^b	1117 ^{ab}	1331 ^a
25 ans (1982-2006)	1261 ^b	1421 ^{ab}	1545 ^a	1528 ^b	2250 ^a	2444 ^a	881 ^b	1047 ^{ab}	1276 ^a
Rendements (%) en 25 ^e année	100	113	122	100	147	160	100	119	149

T1 : gestion extensive des résidus + Fumure minérale, T2 : gestion semi-intensive des résidus + Fumure minérale + compost, T3 : gestion intensive des résidus + Fumure minérale + fumier. Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher.

Les restitutions au sol du compost et du fumier ont amélioré les rendements des cultures de façon significative après 15 à 18 années. Par rapport au témoin sans aucune restitution organique, l'augmentation des rendements en 25 ans, due à cet apport de fumier a été, respectivement, de 22, 60 et 44% sur le coton, le maïs et le sorgho. L'accroissement des

rendements dû à l'apport de compost a été de 13% sur le coton, 45% sur le maïs et 19% sur le sorgho.

Par rapport à la gestion extensive basée sur l'exportation des résidus de récolte du champ et sur l'utilisation d'engrais acidifiants, le recyclage des résidus en compost ou en fumier et leur restitution au sol s'avère indispensable pour l'accroissement des rendements.

Il a été observé sur la durée de mise en culture des terres, une baisse du rendement des cultures, quelle que soit la gestion des résidus de récolte. Cette baisse des rendements est accentuée par l'exportation des résidus de récolte.

Pour le coton, l'évolution des rendements en coton graine, en mode de gestion extensive des résidus peut alors s'exprimer suivant l'équation : $Y \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = -22,12 X + 1778$ (4), avec $r^2 = 0,98$ et où X est le nombre d'années de mise en culture des terres (Figure 18). La baisse de rendement après 25 années d'apport de fumure minérale exclusive sur le coton est 2,7 fois plus importante que celle observée avec l'apport combiné du compost et de la fumure minérale.

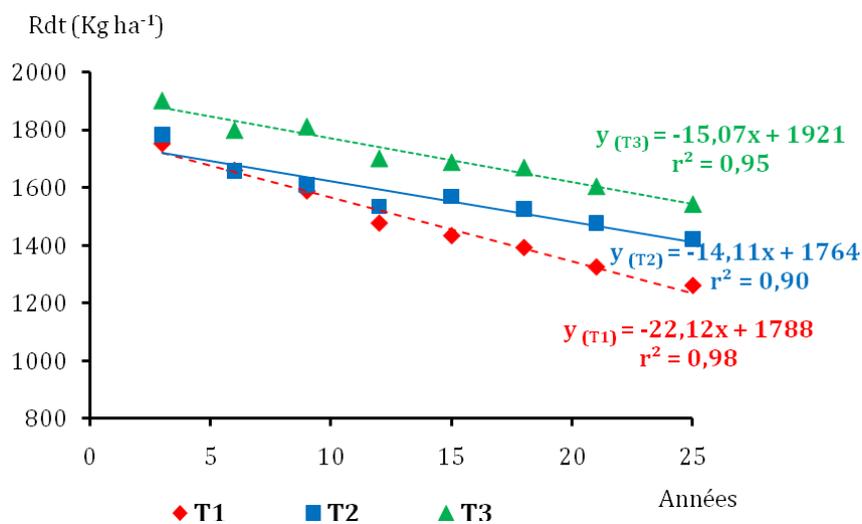


Figure 18. Evolution des rendements du coton graine en fonction de la durée de mise en culture des terres et des modes de gestion des résidus de récolte.

T1 : gestion extensive des résidus + Fumure minérale, T2 : gestion semi-intensive des résidus + Fumure minérale + compost, T3 : gestion intensive des résidus + Fumure minérale + fumier.

Dans le cas du maïs, en 25 ans, la baisse des rendements avec la fumure minérale était de 28%, contre 14% et 10%, avec les apports respectifs du compost et du fumier (Figure 19).

En 25 ans, le rendement du sorgho en gestion extensive des résidus de récolte a chuté de 41%, contre une baisse de 26% et 13% avec le compost et le fumier, respectivement, en gestion semi-intensive et intensive des résidus de récolte (Figure 20).

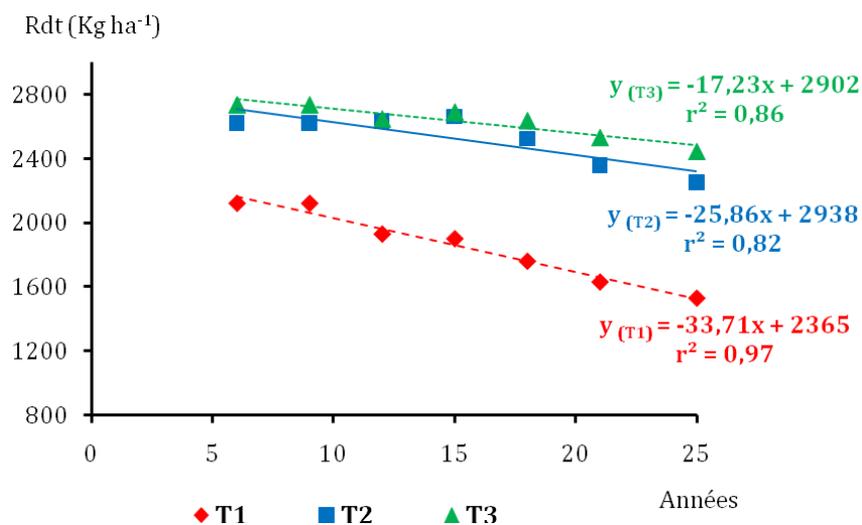


Figure 19. Evolution des rendements du maïs en fonction de la durée de mise en culture des terres et des modes de gestion des résidus de récolte.

T1 : gestion extensive des résidus + Fumure minérale, T2 : gestion semi-intensive des résidus + Fumure minérale + compost, T3 : gestion intensive des résidus + Fumure minérale + fumier.

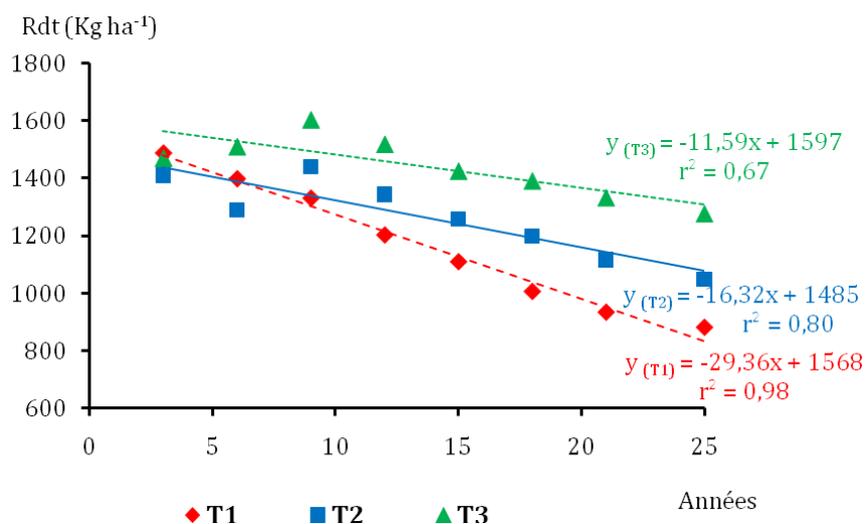


Figure 20. Evolution des rendements du sorgho en fonction de la durée de mise en culture des terres et des modes de gestion des résidus de récolte.

T1 : gestion extensive des résidus + Fumure minérale, T2 : gestion semi-intensive des résidus + Fumure minérale + compost, T3 : gestion intensive des résidus + Fumure minérale + fumier.

De façon générale, en 25 années d'exploitation des terres, le recyclage des résidus de récolte et leur restitution au sol permettent de réduire 2 à 3 fois la baisse des rendements par rapport la gestion extensive sans aucune restitution de ces résidus.

6.1.3. Effets de la gestion des résidus de récolte sur les bilans cultureaux

• Azote

Au bout de 25 années d'exploitation continue des terres, les bilans cultureaux théoriques pour l'azote, le phosphore, le potassium et le soufre sont présentés dans les tableaux L a, L b, L c et L d. Tous les traitements dégagent des bilans excédentaires sauf la gestion extensive des résidus de récolte associée à la fumure minérale seule, qui affiche un déficit en potassium (Tableau L c).

Tableau L a. Bilan cultural en azote en fonction des modes de gestion des résidus de récolte en 25 années d'exploitation des terres

Composantes du bilan		Traitements		
		T1	T2	T3
		N (kg ha ⁻¹)		
Apport d'azote par les fumures	Coton	46	46	46
	Maïs	74	203	207
	Sorgho	46	46	46
Apport annuel		55	98	100
Apport total en 25 ans		1383	2455	2495
Exportations d'azote par les cultures	Coton	50	56	61
	Maïs	47	42	45
	Sorgho	59	70	85
Exportation moyenne par an		52	56	64
Exportation totale en 25 ans		1295	1400	1598
Bilan en N au bout de 25 années		+ 88	+ 1055	+ 897

T1 : gestion extensive des résidus + Fumure minérale, T2 : gestion semi-intensive des résidus + Fumure minérale + compost, T3 : gestion intensive des résidus + Fumure minérale + fumier.

Le mode de gestion extensive avec l'exportation des résidus de récolte et l'utilisation de la fumure minérale seule, donne un bilan cultural en azote qui est excédentaire de + 88 kg N ha⁻¹. L'enfouissement au sol des tiges de maïs et l'application du compost et du fumier

permettent des bilans azotés positifs de + 1055 et + 897 kg N ha⁻¹ qui sont 10 à 12 fois plus importants que celui observé en gestion extensive des résidus de récolte (Tableau L a). Le bilan cultural théorique fait ressortir que les fumures associées aux trois modes de gestion des résidus récolte ont permis de compenser les exportations minérales d'azote durant 25 années de culture continue dans ce système de rotation coton-maïs-sorgho.

• Phosphore

En 25 années de gestion traditionnelle basée sur l'exportation des résidus de récolte, le bilan cultural dégage un excédent de + 287 kg P₂O₅ ha⁻¹ (Tableau L b).

Tableau L b. Bilan cultural en phosphore en fonction des modes de gestion des résidus de récolte en 25 années d'exploitation des terres

Composantes du bilan		Traitements		
		T1	T2	T3
		P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)		
Apport de phosphore par les fumures	Coton	25	0	25
	Maïs	25	112	89
	Sorgho	25	0	25
Apport annuel		25	37	46
Apport total en 25 ans		625	931	1161
Exportations de phosphore par les cultures	Coton	14	15	17
	Maïs	5	3	3
	Sorgho	23	27	33
Exportation moyenne par an		14	15	18
Exportation totale en 25 ans		338	377	439
Bilan en P au bout de 25 années		+ 287	+ 554	+ 722

T1 : gestion extensive des résidus + Fumure minérale, T2 : gestion semi-intensive des résidus + Fumure minérale + compost, T3 : gestion intensive des résidus + Fumure minérale + fumier.

Le recyclage des tiges de sorgho en compost et en fumier améliore les bilans en phosphore, qui sont 2 fois plus élevés qu'en gestion extensive des résidus de récolte. En gestion semi-intensive où le phosphate naturel est apporté au cours du compostage, l'excédent du bilan de + 554 kg P₂O₅ ha⁻¹, est nettement inférieur à celui obtenu en gestion intensive des résidus où le phosphate naturel est appliqué pendant l'épandage du fumier.

•Potassium

L'exportation des résidus de récolte a entraîné un bilan potassique déficitaire de - 313 kg K ha⁻¹, tandis que le compost et le fumier (associés à la fumure minérale) ont permis de dégager des bilans excédentaires de + 571 à + 413 kg K ha⁻¹ (Tableau L c). Le déficit en potassium entraîne une acidification du sol par l'appauvrissement du complexe adsorbant en K⁺.

Tableau L c. Bilan cultural en potassium en fonction des modes de gestion des résidus de récolte en 25 années d'exploitation des terres

Composantes du bilan		Traitements		
		T1	T2	T3
		K (kg ha ⁻¹)		
Apport de potassium par les fumures	Coton	48	48	48
	Maïs	60	163	168
	Sorgho	0	0	0
Apport annuel		36	70	71
Apport total en 25 ans		900	1756	1782
Exportations de potassium par les cultures	Coton	42	47	51
	Maïs	42	21	23
	Sorgho	62	74	90
Exportation moyenne par an		49	47	55
Exportation totale en 25 ans		1213	1185	1369
Bilan en K au bout de 25 années		- 313	+ 571	+ 413

T1 : gestion extensive des résidus + Fumure minérale, T2 : gestion semi-intensive des résidus + Fumure minérale + compost, T3 : gestion intensive des résidus + Fumure minérale + fumier.

•Soufre

Les exportations de soufre par les cultures ont été couvertes par les fumures apportées, qui indiquent des bilans culturaux positifs pour tous les traitements (Tableau L d). Comparativement à l'exportation des résidus de récolte, l'enfouissement des tiges de maïs et le recyclage de ces résidus en compost et en fumier permettent d'améliorer 3 à 4 fois les bilans en soufre.

Tableau L d. Bilan cultural en soufre en fonction des modes de gestion des résidus de récolte en 25 années d'exploitation des terres

Composantes du bilan		Traitements		
		T1	T2	T3
		S (kg ha ⁻¹)		
Apport de potassium par les fumures	Coton	18	18	18
	Maïs	0	18	18
	Sorgho	0	0	0
Apport annuel		6	12	12
Apport total en 25 ans		150	300	300
Exportations de potassium par les cultures	Coton	8	9	10
	Maïs	3	2	2
	Sorgho	1	1	2
Exportation moyenne par an		4	4	4
Exportation totale en 25 ans		97	103	113
Bilan en K au bout de 25 années		+ 53	+ 197	+ 187

T1 : gestion extensive des résidus + Fumure minérale, T2 : gestion semi-intensive des résidus + Fumure minérale + compost, T3 : gestion intensive des résidus + Fumure minérale + fumier.

Les bilans culturaux positifs pour la plupart des éléments minéraux (N, P et S), ne laissent entrevoir aucune tendance à l'acidification de ces sols, sauf pour le potassium en gestion extensive des résidus de récolte.

6.2. Evolution des propriétés chimiques du sol sous différents modes de gestion des résidus de récolte

Alors que la baisse des rendements traduit clairement une dégradation de la fertilité du sol, les bilans culturaux excédentaires semblent, au contraire, indiquer un enrichissement du sol en azote, en phosphore et en soufre.

6.2.1. Evolution du carbone et de l'azote sur l'acidification du sol

• Carbone

L'exploitation des terres pendant 25 années a entraîné une baisse des teneurs en carbone, quelle que soit la gestion des résidus de récolte et les fumures appliquées (Tableau

LI). Durant les premières années, les teneurs en carbone du sol ont chuté de façon spectaculaire sur l'ensemble des traitements. En gestion extensive des résidus de récolte, le carbone total du sol a régressé de 9,4 à 5,85 g kg⁻¹ en seulement 6 années, avant de se stabiliser.

Tableau LI. Evolution des teneurs en carbone en 25 années d'exploitation des terres sous différents modes de gestion des résidus de récolte (horizon 0-20 cm)

Durée de mise en culture	T1	T2	T3
	C (g kg ⁻¹)		
1 an	9,40 ± 0,21	8,50 ± 0,21	8,20 ± 0,42
6 ans	5,85 ± 0,78	7,25 ± 0,07	5,60 ± 1,06
12 ans	5,55 ± 2,19	7,10 ± 0,71	6,30 ± 1,04
18 ans	5,50 ± 0,42	6,88 ± 0,16	7,01 ± 0,13
25 ans	5,24 ± 1,40	6,56 ± 0,98	7,14 ± 0,06
Baisse en 25 ans (%)	44	23	13

Chaque valeur dans le tableau représente la moyenne de 6 mesures.

T1 : gestion extensive des résidus + Fumure minérale, T2 : gestion semi-intensive des résidus + Fumure minérale + compost, T3 : gestion intensive des résidus + Fumure minérale + fumier.

En 25 années de gestion extensive des résidus de récolte, la baisse cumulée des teneurs en carbone était de 44%, contre un déficit de 23 et 13%, respectivement, dans les parcelles en gestion semi-intensive et en gestion intensive des résidus. Annuellement, les teneurs en carbone baissent en moyenne de 1,8% en gestion extensive des résidus de récolte, contre 0,9% en gestion semi-intensive des résidus et 0,6% en gestion intensive des résidus. Cette baisse des teneurs en carbone du sol, aggravée par l'exportation de résidus de récolte, constitue un facteur de dégradation et d'acidification du sol.

• Azote

Les teneurs en azote des sols ont baissé sur l'ensemble des parcelles avec la durée de mise en culture des terres (Tableau LII). En 25 années d'exploitation des terres, l'azote a baissé de 53% en gestion extensive des résidus de récolte, contre, respectivement, 34 et 16% en gestion semi-intensive et en gestion intensive. Quelle que soit la gestion des résidus de récolte, la mise en culture des terres entraîne une chute des teneurs en azote du sol, qui est d'autant plus importante que les résidus sont exportés.

L'enfouissement des tiges de maïs et l'utilisation des fumures minérales et organiques en gestion semi-intensive et en gestion intensive des résidus de récolte, permettent d'atténuer

la dégradation de la fertilité des terres, notamment la chute conjuguée des teneurs en carbone et en azote, qui acidifie le sol.

Tableau LII. Evolution des teneurs en azote des sols sous différents modes de gestion des résidus de récolte dans l'horizon 0-20cm

Durée de mise en culture	T1	T2	T3
	N (g kg ⁻¹)		
1 an	0,85 ± 0,06	0,79 ± 0,08	0,68 ± 0,07
6 ans	0,55 ± 0,03	0,37 ± 0,03	0,33 ± 0,08
12 ans	0,37 ± 0,03	0,55 ± 0,04	0,48 ± 0,02
18 ans	0,50 ± 0,12	0,63 ± 0,02	0,56 ± 0,04
25 ans	0,40 ± 0,13	0,52 ± 0,10	0,57 ± 0,02
Baisse en 25 ans (%)	53	34	16

Chaque valeur dans le tableau représente la moyenne de 6 mesures.

T1 : gestion extensive des résidus + Fumure minérale, T2 : gestion semi-intensive des résidus + Fumure minérale + compost,

T3 : gestion intensive des résidus + Fumure minérale + fumier.

6.2.2. Evolution des teneurs en phosphore du sol

Les teneurs en phosphore total et en phosphore assimilable des sols sont présentées dans le tableau LIII. Les teneurs en P total dans ces sols sont assez faibles (107 à 340 mg kg⁻¹) pour un seuil critique de 200 mg kg⁻¹. Ces teneurs en P total ont baissé de 23 à 25% en 25 années. La perte en P total des sols est de l'ordre de 1% par an, et ce, quel que soit le mode de gestion des résidus de récolte.

Tableau LIII. Evolution des teneurs en phosphore total et phosphore assimilable des sols

Durée de mise en culture	T1	T2	T3	T1	T2	T3
	P total (mg kg ⁻¹)			P assimilable (mg kg ⁻¹)		
1 an	240 ± 12,12	265 ± 23,94	217 ± 22,63	-	-	-
6 ans	279 ± 57,98	296 ± 12,83	235 ± 14,14	19,50 ± 2,12	18,00 ± 1,41	18,50 ± 0,71
12 ans	242 ± 3,82	340 ± 16,08	251 ± 4,60	10,07 ± 2,82	12,63 ± 3,70	12,07 ± 3,36
18 ans	107 ± 20,03	222 ± 39,21	140 ± 36,91	9,00 ± 2,26	15,28 ± 4,08	10,79 ± 2,44
25 ans	186 ± 7,19	199 ± 22,96	165 ± 12,42	8,72 ± 1,37	10,87 ± 2,28	10,08 ± 1,11
Baisse en 25 ans (%)	23	25	24	55	40	46

- : Donnée non déterminée. Chaque valeur dans le tableau représente la moyenne de 6 mesures.

T1 : gestion extensive des résidus + Fumure minérale, T2 : gestion semi-intensive des résidus + Fumure minérale + compost,

T3 : gestion intensive des résidus + Fumure minérale + fumier.

Suite à l'exploitation des terres, les teneurs en P assimilable sont passées de 19,5 à 8,72 mg kg⁻¹, ce qui correspond à une baisse de 55% en gestion extensive des résidus. La baisse du P assimilable est de 40% en gestion semi-intensive des résidus, contre 46% en gestion intensive des résidus (Tableau LIII).

6.2.3. Evolution des bases échangeables et de la CEC du sol

Le bilan des entrées et sorties en cations Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ et Na⁺ est en général approprié pour diagnostiquer le risque d'acidification. Le tableau LIV résume les réserves en bases échangeables, la SBE et la CEC des sols.

Tableau LIV. Evolution des réserves en bases échangeables et de la capacité d'échange cationique des sols en 25 années d'exploitations des terres

Traitements	Durée de mise en culture	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SBE	CEC	S/T
		cmol ⁺ kg ⁻¹						%
T1	1 an	2,43	0,93	0,36	0,04	3,79	5,81	65
	6 ans	1,91	0,60	0,15	0,04	2,70	3,32	84
	12 ans	1,95	0,43	0,10	0,05	2,65	4,11	77
	18 ans	1,77	0,36	0,19	0,05	2,36	3,68	63
	25 ans	1,37	0,29	0,11	0,03	1,79	2,55	65
Baisse en 25 ans (%)		29	51	27	35	34	56	-
T2	1 an	2,16	0,81	0,44	0,11	3,52	6,08	58
	6 ans	1,95	0,66	0,23	0,05	2,89	3,68	85
	12 ans	2,43	0,62	0,14	0,08	3,37	5,00	76
	18 ans	2,19	0,47	0,19	0,05	2,90	4,46	65
	25 ans	1,50	0,33	0,12	0,03	1,99	3,82	52
Baisse en 25 ans (%)		23	49	46	39	31	37	-
T3	1 an	2,31	0,91	0,40	0,04	3,66	5,32	69
	6 ans	2,16	0,76	0,21	0,04	3,20	3,70	89
	12 ans	2,71	0,77	0,49	0,05	3,72	6,63	72
	18 ans	2,16	0,55	0,19	0,03	2,92	3,94	74
	25 ans	2,07	0,54	0,14	0,03	2,77	3,82	73
Baisse en 25 ans (%)		4	29	33	35	24	28	-

Chaque valeur dans le tableau représente la moyenne de 6 mesures.

T1 : gestion extensive des résidus + Fumure minérale, T2 : gestion semi-intensive des résidus + Fumure minérale + compost, T3 : gestion intensive des résidus + Fumure minérale + fumier.

• Bases échangeables

Le calcium et le magnésium qui constituent les cations majeurs du complexe adsorbant ont subi d'importantes variations. En 25 années d'exploitation continue des terres, les teneurs en Ca^{2+} ont baissé de 2,43 à 1,37 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$, ce qui représente une baisse cumulée de 29% sur les sols en gestion extensive des résidus de récolte. En gestion semi-intensive et en gestion intensive des résidus de récolte, les teneurs en Ca^{2+} ont baissé, respectivement, de 23 et 4%.

La baisse des teneurs en Mg^{2+} des sols est 2 à 3 fois plus importante que celle du Ca^{2+} . En 25 années, les teneurs en Mg^{2+} ont baissé, respectivement, de 51 et 49% en gestion extensive et en gestion semi-intensive, contre une baisse de 29% en gestion intensive des résidus de récolte. Ces pertes considérables de Ca^{2+} et Mg^{2+} conduisent à un appauvrissement progressif du complexe argilo-humique, et partant, à une acidification du sol. La restitution des résidus de récolte par le compost ou le fumier, permet de réduire sensiblement les pertes de ces cations qui exposent le sol à l'acidification.

Les teneurs en K^+ échangeable ont baissé de 27 à 46%, et celles en Na^+ , de 35 à 39% en 25 années d'exploitation des terres, quelle que soit la gestion des résidus de récolte (Tableau LIV). L'on constate que la durée de mise en culture des sols entraîne un appauvrissement du complexe adsorbant en bases échangeables, notamment en Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ , accentuant une tendance à l'acidification du sol.

• Somme des bases échangeables

L'on observe également, avec la durée de mise en culture, une importante baisse de la somme des bases échangeables (SBE). Cette baisse, qui est de 34% en gestion extensive des résidus de récolte, dépasse celles notées en gestion semi-intensive (31%) et en gestion intensive des résidus de récolte (24%).

• Capacité d'échange cationique

Ces sols présentent une faible CEC, qui variait entre 5,32 et 6,08 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ en début d'étude. Durant les six premières années, la CEC a baissé de façon rapide, tout comme les teneurs en carbone. Les valeurs de la CEC sont alors passées de 5,81 à 3,32 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ dans les parcelles en gestion extensive des résidus, de 6,08 à 3,68 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ dans les parcelles en gestion semi-intensive et de 5,32 à 3,70 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ dans celles en gestion intensive des résidus de récolte. Un redressement des valeurs de la CEC est perceptible à partir de la 12^e année d'étude, après le chaulage effectué sur toutes les parcelles. Par la suite, une baisse progressive de la CEC est observée. Dans les sols sous gestion semi-intensive des résidus de récolte, la CEC a chuté de 6,08 à 3,82 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ en 25 années, soit une baisse de 37% (Tableau LIV).

La CEC, en passant de 5,32 à 3,82 cmol⁺ kg⁻¹, a baissé de 28% en 25 années de gestion intensive des résidus, contre une baisse de 56% en gestion extensive des résidus.

Quel que soit le mode de gestion des résidus de récolte, la saturation du complexe est peu influencée sur la durée d'exploitation des terres ; mais, après 18 à 25 années, il se produit une forte désaturation du complexe adsorbant en gestion semi-intensive des résidus de récolte (Tableau LIV).

La baisse progressive de la CEC avec la durée de mise en culture accroît le risque d'acidification du sol, et ce, quel que soit le mode de gestion des résidus de récolte (Tableau LIV).

6.2.4. Effet de la gestion des résidus de récolte sur l'évolution du pH du sol

Il ressort du tableau LV que la mise en culture des terres a entraîné une acidification rapide par une baisse du pH eau et du pH KCl, observée surtout durant les huit premières années.

Tableau LV. Evolution du pH eau, du pH KCl et du Δ pH en 25 ans de mise en culture des sols

Durée de mise en culture	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
	pH eau			pH KCl			Δ pH		
1 an	6,10	5,90	6,35	5,10	4,70	5,30	1,00	1,20	1,05
6 ans	5,85	5,53	5,88	4,50	5,10	5,15	1,35	0,43	0,73
8 ans	4,95	5,50	5,55	4,25	5,0	5,35	0,70	0,50	0,20
12 ans	5,88	5,61	5,63	-	-	-	-	-	-
15 ans	5,99	6,18	6,04	4,87	4,65	4,94	1,12	1,53	1,10
18 ans	5,90	5,97	5,99	5,20	5,37	5,49	0,70	0,60	0,50
25 ans	6,18	6,08	6,24	5,53	5,33	5,49	0,65	0,75	0,75

- : Donnée non déterminée. Chaque valeur dans le tableau représente la moyenne de 6 mesures.

T1 : gestion extensive des résidus + Fumure minérale, T2 : gestion semi-intensive des résidus + Fumure minérale + compost, T3 : gestion intensive des résidus + Fumure minérale + fumier.

En gestion extensive des résidus de récolte, le pH eau, qui est passé de 6,1 à 4,95 a chuté de 1,5 unités après seulement huit années. Cette baisse drastique du pH eau a été aussi observée dans les sols en gestion semi-intensive et en gestion intensive des résidus de récolte, ce qui a d'ailleurs nécessité un chaulage en 1989 pour y remédier (Nyangezi, 1989).

Les différences entre le pH eau et le pH KCl (Δ pH), qui sont le plus souvent supérieures à 0,5, montrent que l'acidité de réserve dans ces sols est moyenne, et très variable dans le temps. Quel que soit le mode de gestion des résidus de récolte, il a été observé en

première et en 15^e années d'exploitation des terres, des valeurs de ΔpH supérieures à 1, ce qui témoigne d'une acidification induite par l'aluminium échangeable.

L'on a observé après le chaulage, une remontée du pH eau, perceptible après 12 et 15 ans. Les variations après 15 années sont moins importantes et le pH semble se stabiliser, voire remonter, après le sous-solage effectué en 1995 au cours de la 14^e année d'exploitation des terres. Après le chaulage et le sous-solage, l'effet des modes de gestion des résidus de récolte a peu influencé le pH qui, après 25 années de culture continue, présente des valeurs comparables à celles observées au début de l'étude. Les variations du pH KCl, bien que moins importantes, indiquent des tendances similaires à celles du pH eau.

6.3. Discussion

6.3.1. Effets de la gestion des résidus de récolte sur la nutrition minérale des cotonniers

Les analyses foliaires permettent de prévoir la probable apparition d'une déficience minérale et de prendre des mesures de fertilisation nécessaires pour l'éviter (Zia-ul-hassan et Arshad, 2008). La satisfaction des besoins des cotonniers pour la plupart des éléments minéraux atteste de l'efficacité des fumures apportées, avec ou sans restitution au sol des résidus de récolte. En 17 années, la gestion extensive des résidus et l'utilisation d'engrais minéraux acidifiants, n'ont pas affecté l'assimilation des éléments minéraux par le cotonnier. Les premières déficiences nutritionnelles en azote et en potassium ne sont apparues sur les cotonniers qu'au bout de 13 années. Ce résultat confirme les travaux de Braud (1987), qui a observé, avec la fertilisation minérale, une nutrition correcte des cotonniers pendant plus de 10 ans. Les différences significatives des teneurs en éléments minéraux dans les feuilles de cotonnier obtenues entre les cycles de rotations, traduisent l'effet de la pluviosité, très déterminante sur la mobilisation et l'absorption de ces éléments (Koulibaly *et al.*, 2010a). La nutrition azotée est liée à la durée utile de la saison des pluies et à l'intensité de la pluviosité qui augmentent sensiblement la lixiviation (Crozier *et al.*, 2004 ; Girma *et al.*, 2007). De tels facteurs pourraient expliquer la déficience azotée et même celle en potassium qui, d'après Braud (1987), est surtout influencée par la pluviosité durant la période comprise entre le 11^e et le 20^e jours avant le prélèvement. De plus, les teneurs en K des feuilles de cotonnier sont fortement corrélées au potassium disponible du sol (Dakouo, 1994 ; Zia-ul-hassan et Arshad, 2008). La nutrition phosphatée des cotonniers était correcte, ce qui suggère de bonnes conditions de solubilisation et d'assimilabilité du phosphate naturel en application directe ou incorporé au compost (FAO, 2004, Lompo *et al.*, 2009). Cela met en évidence l'efficacité et

l'intérêt du phosphate naturel dont la valorisation devrait permettre de réduire l'acidification dans les systèmes de culture coton-céréales. La déficience exceptionnelle en soufre sur le témoin sans restitution organique semble liée au déficit d'azote, du fait des rapports étroits entre ces deux éléments. En 17 années, les fumures associées aux trois modes de gestion des résidus de récolte se sont révélées efficaces et adaptées pour les besoins du cotonnier en calcium, en magnésium et surtout en bore, dont les teneurs dépassent largement le niveau critique de 21 mg kg⁻¹ (Braud, 1987). L'enfouissement des tiges de maïs et le recyclage des tiges de sorgho en compost ou en fumier, qui sont surtout favorables à l'amélioration des teneurs en calcium et en magnésium des cotonniers, sont recommandés. L'assimilation de la plupart des éléments nutritifs n'a pas été affectée par l'acidité du sol en 17 années d'exploitation des terres.

6.3.2. Effets de la gestion des résidus de récolte et des fumures sur les rendements des cultures

La baisse des rendements avec la durée de mise en culture des terres est principalement attribuée à une dégradation du sol, qui serait accentuée par l'exportation des résidus de récolte. Dans cette zone cotonnière, Ouattara *et al.* (2006) soulignent les limites de l'utilisation de la fumure minérale, qui ne permet de maintenir les rendements des cultures que pendant seulement 5 à 6 années. La baisse générale du potentiel de production est aussi imputable à la persistance des déficits pluviométriques qui caractérisent les variations du climat au Burkina Faso (Sivakumar et Gnoumou, 1987). A risque climatique de même intensité, les conséquences des déficits pluviométriques sur les productions agricoles seront d'autant plus importantes que le caractère extensif du système d'exploitation est marqué (Somé et Dembélé, 1996 ; Abou Abba *et al.*, 2006 ; Bénéoit, 2008). Les restitutions organiques permettent d'améliorer les propriétés bio-physico-chimiques du sol, surtout sa disponibilité en éléments nutritifs (Vullioud *et al.*, 2004). A 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 (Koulibaly *et al.*, 2010a).

6.3.3. Effets de la gestion des résidus de récolte sur les bilans cultureux

La plupart des exportations minérales sont bien compensées par la fumure minérale, sans restitution des résidus de récolte, qui dégage des bilans excédentaires en azote, en phosphore et en soufre. En revanche, le déficit du bilan potassique montre clairement que la fumure minérale seule ne permet pas de compenser les exportations, surtout que les céréales

sont fortement consommatrices de potassium (Traoré, 1995). Ce déficit en potassium conduit à une acidification progressive du sol à cause des pertes du complexe adsorbant en K^+ et de leur remplacement par des ions acides (Ciesielski *et al.*, 2008). Seuls, l'enfouissement direct des tiges de maïs et la transformation des tiges de sorgho en compost ou en fumier, associés aux fumures minérales, permettent d'obtenir des bilans potassiques positifs (Koulibaly *et al.*, 2010b). Le compost et le fumier ont amélioré les bilans minéraux grâce aux nutriments apportés par la minéralisation de ces substrats (Veltof *et al.*, 1998 ; Bondé, 2007). Ce résultat est en accord avec les travaux de Sédogo (1993), qui a mis en évidence des bilans positifs suite à des apports au sol de fumures organiques en 32 années de culture continue d'un sol ferrugineux (lixisol). L'amélioration du bilan phosphaté avec l'adjonction du phosphate naturel au cours du compostage, confirme l'efficacité de cette forme d'utilisation de ce substrat par rapport à son application directe au sol (FAO, 2004; Lompo *et al.*, 2009).

Alors que la baisse des rendements traduit clairement une dégradation de la fertilité du sol, les bilans culturaux excédentaires semblent, au contraire, indiquer un enrichissement du sol en azote, en phosphore et en soufre. D'après Ouédraogo *et al.* (2001), la durabilité de la capacité de production des sols sous culture repose essentiellement sur l'équilibre entre les fertilisants ainsi que sur les pertes et exportations par les plantes en termes d'éléments nutritifs. De ce fait, sans intégrer les pertes de nutriments du sol (lessivage, lixiviation, érosion), le bilan cultural théorique ne permet pas d'appréhender l'appauvrissement du sol, ni le risque d'acidification qui en découle.

6.3.4. Evolution des propriétés chimiques du sol sous différents modes de gestion des résidus de récolte

Les résultats révèlent que la plupart des caractéristiques chimiques du sol sont affectées par l'exploitation des terres, et ce, quel que soit le mode de gestion des résidus de récolte et les fumures minérales appliquées. Cette baisse de la fertilité du sol est considérée comme une importante cause de la faible productivité des sols tropicaux (Sanchez, 2002). La fertilisation minérale, sans aucune restitution organique, affecte davantage les caractéristiques chimiques du sol avec la durée de mise en culture des terres, ce qui explique d'ailleurs les limites de cette fumure. Cette pratique correspond pourtant à celle qui prédomine dans les systèmes de culture coton-céréales, et qui conduit généralement à l'épuisement des terres ou à leur acidification (Cattan *et al.*, 2001 ; Vanlauwe *et al.*, 2005).

Avec la durée de mise en culture des terres, la baisse des teneurs en carbone affecte l'état du complexe adsorbant et acidifie progressivement le sol, à cause de la perte de matière

organique et des bases échangeables qui en résulte. La perte rapide du carbone observée durant les huit premières années d'étude serait à l'origine de la désaturation du complexe adsorbant, qui a justifié le chaulage en 1989, après 9 années de mise en culture des terres. Sur ce même site de Boni, Berger *et al.* (1987) ont déterminé un taux de minéralisation de la matière organique de 2 à 4% par an, ce qui explique la baisse des teneurs en C total du sol dans les systèmes de culture coton-céréales. Dans ces systèmes de culture, l'exportation des résidus de récolte et l'utilisation quasi-exclusive de fumure minérale, qui constituent la pratique dominante, accentuent les pertes en carbone du sol, et le rendent plus sensible à l'acidification. Les effets des substrats organiques sur les propriétés bio-physico-chimiques du sol évoqués par Takata *et al.* (2008), expliqueraient la réduction des pertes en carbone, en Ca^{2+} et en Mg^{2+} , qui atténue le processus d'acidification du sol après l'enfouissement des tiges de maïs et la restitution de compost ou de fumier.

Avec la durée de mise en culture des terres, la baisse des teneurs en carbone, même après des apports de compost ou de fumier, précédés d'un enfouissement des tiges de maïs, est attribuable en partie au labour annuel, qui annihile la protection de la matière organique et sa minéralisation accélérée (Elherradi *et al.*, 2003 ; Benjamin *et al.*, 2010). Selon Berger *et al.* (1987), un apport de 6 t ha^{-1} de fumier tous les trois ans permet de compenser les pertes de carbone du sol par minéralisation de la matière organique. Les pertes de carbone observées en dépit des apports de 6 t ha^{-1} de compost ou de fumier par le recyclage de tiges de sorgho, en gestion semi-intensive et en gestion intensive des résidus de récolte, suggèrent d'autres pertes de carbone, notamment par lessivage ou par érosion, qui ne sont pas négligeables en 25 années d'exploitation continue des terres. Cette diminution du stock organique des sols et l'érosion sont les processus d'évolution affectant le plus la capacité de production des sols (Bationo *et al.*, 2004 ; Pouya, 2007). Par conséquent, les réserves organiques du sol peuvent être considérées comme un capital à entretenir et à améliorer, dans le cadre d'une gestion durable des agro-systèmes (Roussel *et al.*, 2001).

En 25 années de mise en culture des terres, les pertes d'azote sont comparables, voire supérieures, à celles du carbone, avec des conséquences similaires sur l'acidification du sol. Le recyclage des résidus de récolte en compost ou en fumier a sensiblement réduit les pertes d'azote par rapport à la gestion extensive des résidus de récolte. Les teneurs en phosphore assimilable demeurent inférieures au seuil critique de 30 ppm, ce qui indique que ces sols sont carencés en phosphore (Traoré *et al.*, 2007 a ; Olina Bassala *et al.*, 2008).

La nutrition phosphatée correcte des cotonniers reflète de bonnes conditions de dissolution du phosphate naturel et des réserves en P du sol, ce qui pourrait justifier en partie,

pour tous les traitements, la baisse des teneurs en P du sol, en deçà du seuil critique de 200 mg kg⁻¹ au bout de 25 ans. Les bilans culturaux ont pourtant révélé des bilans phosphatés positifs, qui montrent que la baisse des teneurs en phosphore dans le sol serait causée par des pertes additionnelles autres que celles occasionnées par les récoltes. C'est pourquoi, l'on peut être fondé à incriminer la complexation du phosphore en P-Al et P-Fe, par les fortes quantités d'ions Al³⁺ et Fe²⁺ résultant de l'altération du matériau parental, très riche en aluminium et en fer dont résultent les sols étudiés.

Hormis le phosphore, les pertes d'éléments minéraux des sols peuvent être attribuées à l'érosion hydrique, qui entraîne des pertes de terre pouvant atteindre en quatre ans, 90 t ha⁻¹ après un labour annuel (Roose et Barthès, 2006). Ces pertes d'éléments minéraux affectent la fertilité et acidifient le sol.

En 1995, un sous-solage a été effectué sur l'essai avant d'implanter, suivant les courbes de niveau, des bandes enherbées d'*Andropogon gayanus* pour lutter contre le ruissellement et l'érosion.

Les résultats obtenus ont montré que ces sols se caractérisent par de faibles réserves en bases échangeables. La baisse progressive des bases échangeables pendant les 25 années résulte essentiellement des pertes liées aux prélèvements de nutriments par les cultures. Ces effets négatifs de la mise en culture des sols, accentués par l'exportation des résidus de récolte sans aucune restitution organique, sont généralement évoqués par divers auteurs (Traoré *et al.*, 2007 b ; Koulibaly *et al.*, 2009a). Les baisses considérables de Ca²⁺ et Mg²⁺ dans les sols en 25 années de culture, affectent la SBE et appauvrissent le complexe adsorbant, les rendant ainsi plus sensibles à l'acidification. Les restitutions des résidus de récolte sous forme de compost ou de fumier permettent de réduire sensiblement les pertes de ces deux cations. Les effets du chaulage semblent plus bénéfiques sur les teneurs en Ca²⁺ qu'il améliore sensiblement. Au-delà des effets directs sur la phase solide du sol et sur la solution du sol, le chaulage se caractérise surtout par des effets indirects sur les propriétés du sol (Fabre et Kockmann, 2002 ; Pouya, 2007).

La très faible capacité d'échange cationique confère à ces sols une faible capacité à maintenir les bases provenant de la minéralisation interne au sol ou des apports extérieurs issus de la fumure minérale (Olina Bassala *et al.*, 2008). La baisse de la CEC est révélatrice de la dégradation chimique du sol, qui est sensiblement réduite par le recyclage des résidus de récolte en compost ou en fumier. La baisse simultanée de la CEC et de la matière organique confirme l'étroitesse des relations entre ces deux paramètres sur les sols ferrugineux (lixisol) (Pallo *et al.*, 2006 ; Pallo *et al.*, 2008). L'effet du chaulage effectué en 1989 a été remarquable

tant sur la CEC que sur le pH du sol qu'il a permis de redresser et même de rehausser après deux années. Cela confirme l'intérêt du chaulage, permettant, non seulement de corriger l'acidité du sol, mais aussi d'améliorer les teneurs des bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+}) et surtout la CEC du sol (Fabre et Kockmann, 2002 ; Pernes-Debuyser et Tessier, 2002). Boyer (1978), rapporte que le chaulage par l'apport de calcium et de magnésium, assure un effet tampon sur le pH. De plus, les apports importants de bases par le chaulage permettraient de compenser les pertes dues aux exportations ou à l'érosion, d'augmenter le taux de saturation du complexe et d'éviter ainsi la fixation des ions acides sur le complexe adsorbant.

Le sous-solage réalisé en 1995, à une profondeur supérieure à 60 cm, pourrait perturber le sol par la remontée en surface de la terre des couches profondes et, ainsi, induire des modifications dans la composition du sol, ce qui peut expliquer les variations inattendues de certains paramètres.

La baisse drastique du pH eau durant les 8 premières années de mise en culture des terres, met en évidence une acidification rapide des sols, qui peut être surtout attribuée à une désaturation du complexe adsorbant perceptible sur tous les traitements. Les restitutions organiques sous forme de compost ou de fumier n'ont pas permis d'éviter cette acidification, ni les importantes baisses des teneurs en carbone et de la valeur de la CEC des sols. Cette acidification pourrait s'expliquer par des prélèvements élevés d'éléments minéraux par les cultures, notamment en calcium et en magnésium, qui ne sont pas compensés par les apports d'engrais minéraux seuls ou associés au compost ou au fumier. Cette baisse du pH est un phénomène qui affecte la plupart des sols après leur mise en culture (Ciesielski *et al.*, 2008). De plus, cela montre les limites de la fertilisation minérale seule (sans calcium, ni magnésium), qui acidifie le sol après seulement quelques années (Bado *et al.*, 1997 ; Pernes-Debuyser et Tessier, 2002). Les restitutions organiques sont apparues insuffisantes pour empêcher la baisse du pH des sols, quoiqu'elles aient permis de réduire leur acidification.

Conclusion

Le recyclage des résidus de récolte en compost ou en fumier, associé à la fumure minérale est efficace sur la nutrition minérale des cotonniers, qui est peu affectée par l'acidité modérée à faible du sol. La nutrition phosphatée correcte des cotonniers met en évidence l'efficacité et l'intérêt du phosphate naturel, dont la valorisation devrait permettre de réduire le coût de la fertilisation dans les systèmes de culture coton-céréales. L'enfouissement au sol des résidus et leur recyclage en fumure organique, combinés à la fumure minérale, réduisent

la baisse des rendements et la dégradation des caractéristiques chimiques liées à l'exploitation continue des terres.

Avec la durée de mise en culture des terres, la plupart des propriétés chimiques du sol baissent, ce qui entraîne une acidification du sol, d'autant plus importante que les résidus de récolte sont exportés. Le recyclage des résidus de récolte réduit le risque d'acidification du sol en atténuant la dégradation des propriétés chimiques du sol, notamment la baisse du taux de carbone, celle des teneurs en bases échangeables et de la CEC. La stabilité relative du pH en 25 années d'exploitation continue des terres est principalement liée à l'action du chaulage conjuguée aux différentes opérations culturales comme l'apport systématique du phosphate naturel, qui se révèlent de ce fait, indispensables pour prévenir l'acidification des sols.

CONCLUSION GENERALE

La gestion durable de la fertilité des sols est un défi majeur pour préserver la productivité des systèmes de culture à base de coton et de céréales. La présente étude avait pour objectif de déterminer les facteurs d'acidification des principaux sols des agrosystèmes cotonniers et de prévenir ce problème à travers, d'une part, l'apport des amendements calco-magnésiens et, d'autre part, la gestion des résidus de récolte.

Les résultats ont montré que la mise en culture des terres est le principal facteur d'acidification des sols en zone cotonnière, ce qui confirme la première hypothèse de recherche. Les sols ferrallitiques (ferralsols) et ferrugineux (lixisols), chimiquement plus pauvres et fragiles, se révèlent sensibles au risque d'acidification que les sols bruns eutrophes (cambisols). Comparativement à la jachère, l'exploitation continue des terres entraîne une dégradation de la plupart des caractéristiques des sols. Elle se traduit par une baisse des teneurs en argile, en carbone, en azote, en éléments totaux, une perte des bases échangeables, une désaturation du complexe adsorbant, ainsi qu'une baisse de la capacité d'échange cationique. Cette dégradation de la fertilité des sols, qui affecte le complexe adsorbant, est un bon indicateur de leur susceptibilité à l'acidification. La culture motorisée est la pratique qui dégrade et acidifie davantage les sols. Cette acidification attribuée à l'utilisation d'engrais minéraux acidifiants et à la fragilisation des sols par les labours répétitifs au tracteur, recommande au plan pratique, de réduire la fréquence de préparation de ces sols, et d'apporter des amendements appropriés.

L'apport des amendements calco-magnésiens en vue de corriger l'acidité du sol, n'améliore pas la nutrition minérale des cultures, évoquée dans la deuxième hypothèse de recherche. Le compost, le phosphate naturel et la dolomie, associés à la fumure minérale, améliorent les rendements, la production de matière sèche, mais augmentent surtout les prélèvements d'éléments minéraux du sol par les cultures. Dans une rotation triennale, les exportations d'éléments minéraux par les résidus de récolte sont aussi importantes que celles dues aux récoltes. Dans la rotation coton-maïs-sorgho, l'exportation des résidus de récolte du champ, qui est généralement pratiquée, entraîne, sur les sols amendés, des bilans cultureux déficitaires en azote et en potassium, qui conduisent à l'appauvrissement du sol et à son acidification. L'amélioration de la productivité des systèmes à base de coton et de céréales montre l'importance des amendements, qui ne suffisent pas à eux seuls, pour neutraliser le processus d'acidification du sol suite à sa mise en culture. Il paraît nécessaire, dans la gestion de la fertilité et de l'acidification de ces sols, d'intégrer toutes les mesures visant à restituer au sol les résidus de récolte dont l'exportation épuise le sol autant que les récoltes.

Après seulement deux années de mise en culture, une tendance à l'acidification se dessine sur les sols amendés, avec un début de baisse de la teneur en matière organique, de la SBE et de la CEC, perceptible sur les sols ferrallitiques (ferralsols), ferrugineux (lixisols) et bruns eutrophes (cambisols) étudiés. Le compost est l'amendement qui assure le mieux, le maintien de la fertilité des sols.

Sur l'activité biologique du sol, dès la première année, les amendements ont rehaussé légèrement le cumul de CO₂ dégagé et, partant, l'activité respiratoire des sols, qui est d'autant plus importante que les sols sont riches en matière organique. La biomasse microbienne, plus faible sur le sol ferrallitique (ferralsol), illustre la faiblesse des entrées de carbone, et met en évidence la dynamique de dégradation chimique du sol ainsi que son acidification. L'amélioration de la biomasse microbienne, dans les sols amendés en compost est liée à l'apport au sol de matière organique facilement décomposable. Les amendements stimulent la minéralisation du carbone en entraînant la prolifération des micro-organismes favorables, qui modifient et influencent l'acidité du sol. Les amendements calco-magnésiens appliqués ne suffisent pas pour corriger l'acidité du sol.

Dans un système de rotation triennale à base de coton et de céréales, le recyclage des résidus de récolte en compost ou en fumier, associé à la fumure minérale, est efficace sur la nutrition minérale des cotonniers, peu affectée par l'acidité et l'acidification du sol. Cette nutrition ne dépend pas seulement des fumures, mais elle est influencée par les conditions pluviométriques très variables dans le temps.

Le phosphate naturel tricalcique, judicieusement utilisé et associé aux fumures minérales permet une bonne nutrition phosphatée et une bonne production des cultures. La valorisation de ce substrat local permettrait de réduire le coût de la fertilisation dans les systèmes de culture coton-céréales. L'utilisation et la promotion de la dolomie devront également être intégrées dans cette démarche, pour lutter contre l'acidification des sols.

Avec l'exploitation continue des terres, il est difficile, voire impossible, de maintenir le potentiel de production selon les pratiques culturales de la zone cotonnière. Nos travaux ont montré que la durée de mise en culture des terres entraîne une baisse systématique des rendements, souvent accentuée par les contraintes pluviométriques. La plupart des caractéristiques chimiques du sol sont affectées par l'exploitation des terres, et ce, quelles que soient les fumures appliquées. L'utilisation de la fumure minérale seule, habituellement pratiquée en zone cotonnière, conduit à l'épuisement rapide et à l'acidification des terres. L'apport conjoint de substrats organiques et de fumure minérale, réduit la baisse des

rendements et se révèle indispensable pour assurer la durabilité des systèmes de production coton-céréales.

Après la mise en culture des terres, la baisse des teneurs en carbone, même après des restitutions organiques, met clairement en cause la pratique systématique du labour annuel, qui ralentit la protection de la matière organique et sa minéralisation accélérée. Pour cette raison, la réduction de l'intensité du travail du sol ne manquerait pas d'intérêt dans ces systèmes, à cause de la fragilité des sols. La durée d'exploitation des terres affecte la plupart des propriétés chimiques du sol qui baissent de façon significative, entraînant l'acidification du sol, qui est d'autant plus importante que les résidus de récolte sont exportés. Le recyclage des résidus de récolte réduit le risque d'acidification du sol, en atténuant la dégradation des propriétés du sol, notamment la baisse du taux de carbone, des teneurs en bases échangeables et de la CEC, ce qui confirme la troisième hypothèse de recherche. La stabilité relative du pH en 25 années d'exploitation continue des terres, est principalement liée à l'action du chaulage, conjuguée aux différentes opérations culturales, et surtout à l'apport systématique du phosphate naturel qui, de ce fait, se révèle incontournable pour prévenir l'acidification des sols.

L'analyse critique des bilans culturaux montre que les apports d'éléments minéraux par les fumures et les exportations minérales directement liées aux cultures, ne justifient pas la dégradation du potentiel chimique, ni l'acidification des sols. Les pertes de nutriments par lessivage ou par érosion n'ont pas été négligeables en 25 années de culture continue, et suggèrent d'en tenir compte dans la détermination des bilans minéraux dans les investigations futures. En outre, des aménagements appropriés des exploitations par des techniques de conservation des eaux et des sols mériteraient d'être associés à la gestion de la fertilité des sols.

En perspective, il est primordial de retenir que malgré les grands enseignements qui se dégagent, la caractérisation de l'acidification des sols en zone cotonnière mérite d'être approfondie et capitalisée en vue d'une modélisation de gestion de la fertilité. Pour cela, les investigations devraient, non seulement s'étendre sur les autres types de sols, mais surtout suivre la dynamique de l'aluminium échangeable qui serait à l'origine de cette acidification. Aussi, nos travaux sur la gestion à long terme des résidus de récolte, indiquent-ils la nécessité de songer à valoriser les tiges de cotonnier, et d'entreprendre des études dans les domaines de la physique et de la biologie du sol, qui permettront, au delà de l'acidification, de mieux assurer une gestion durable de la fertilité des sols.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbadie L., Lata J.C., Tavernier V., 2000.** Impact des graminées sur une ressource rare : l'azote. In : La jachère en Afrique tropicale. Ch Floret, R. Pontanier (Eds) John Libbey Eurotext, Paris, pp. 189-193.
- Abessolo M.B., 2001.** Variabilité génétique de la tolérance à l'acidité des sols tropicaux. Mémoire d'ingénieur, option agronomie, Institut du Développement Rural, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (UPB), 80 p.
- Abou Abba 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), pp. 351–359.
- AFD, 2007.** La crise de la filière coton : conséquences économiques et financières au Burkina Faso. Document de travail n°48, 30 p.
- Agoumé V., Birang AM., 2009.** Impact of land-use systems on some physical and chemical soil properties of an oxisol in the humid forest zone of southern Cameroon. *Tropicultura*, 27(1), pp. 15-20.
- AICB., 2008.** Note d'information sur la filière coton du Burkina Faso. Secrétariat Général, 8 p.
- Bacyé B., Moreau R., Feller C., 1998.** Décomposition d'une poudrette de fumier incorporée dans un sol sableux de versant et un sol argilo-limoneux de bas-fond en milieu soudano-sahélien. *Etude et Gestion des Sols*, 5(2), pp. 83-92.
- Bado B.V., 2002.** Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. Thèse de doctorat (Ph.D.), Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation. Université de Laval, Québec, 184 p.
- Bado B.V., Dakuo D., N'Dayegamiye A., Cescas M., 1993.** Effet de la dolomie sur la production et les propriétés chimiques d'un sol ferrallitique. *Agrosol* VI (2), pp. 22-24.
- Bado B.V., Sédogo P.M., Cescas M.P., Lompo F., Bationo A., 1997.** Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. *Cahiers Agric.*, 6(6), pp. 547-626.
- Barro A., Zougmore R., Sédogo M.P., 2009.** Evaluation de la faisabilité de trois types de travail du sol : application du modèle Sarra dans le Plateau central au Burkina Faso. *Sécheresse*, 20(4), pp. 338-345.
- Barthès B., Albrecht A., Asseline J., De Noni G., Roose E., Viennot M., 1998.** Pratiques de l'érodibilité du sol dans les Rougiers de Camarès (Aveyron). *Étude et Gestion des Sols*, 5(3), pp. 157-170.
- Bationo A., Mokwunye A.U., 1991.** Alleviating soil fertility constraints to increased crop production in West Africa. The experience of the Sahel. In: Alleviating soil fertility. Academic Publishers, Dordrecht; pp. 195-215.

- 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, pp. 173-198.
- Benjamin J.G., Halvorson A.D., Nielsen D.C., Mikha M.M., 2010.** Crop management effects on crop residue production and changes in soil organic carbon in the Central Great Plains. *Agronomy Journal*, 102, pp. 990-997.
- Bénoît E., 2008.** Les changements climatiques : vulnérabilité, impacts et adaptation dans le monde de la médecine traditionnelle au Burkina Faso. *Vertigo – La revue en sciences de l'environnement*, 8(1), pp. 1-12.
- Berger M., 1996.** L'amélioration de la fumure organique en Afrique Soudano-sahélienne. *Agric dév* hors série, fiches techniques. Montpellier : cirad éditions, 29 p.
- Berger M., Belem P.C., Dakouo D., Hien V., 1987.** Le maintien de la fertilité dans l'Ouest du Burkina Faso et la nécessité de l'association agriculture-élevage. *Cot. Fib. Trop.*, XLII (3), pp. 201-210.
- Bertrand R., Gigou J., 2000.** La fertilité des sols tropicaux acides. ACCT, Ed. Maisonneuve & Larose, Paris, 397 p.
- Blair N., Faulkner R.D., Till A.R., Poulton P.R., 2006.** Long-term management impacts on soil C, N and physical fertility: Part I: Brodbalk experiment. *Soil Till Res*, 91, (1-2), pp. 30-38.
- Boizard H., Richard G., Defossez P., Roger Estrade J., Boiffin J., 2004.** Etude de l'effet à moyen et long terme des systèmes de culture sur la structure d'un sol limoneux-argileux du Nord du Bassin Parisien. Les enseignements de l'essai de longue durée d'Estrées-Mons (80). *Étude et Gestion des Sols*, 11(1), pp. 11-20.
- Boli Z et Roose E., 2000.** Rôle de la jachère de courte durée dans la restauration de la productivité des sols dégradés par la culture continue en savane soudanienne humide du nord-Cameroun. In : La jachère en Afrique tropicale. Ch Floret, R. Pontanier (Eds) John Libbey Eurotext, Paris, pp.149-154.
- Bondé D., 2007.** Effets des modes de gestion de la fertilité sur les exportations des cultures dans la rotation coton-mais-sorgho. Mémoire d'ingénieur, option agronomie, Institut du Développement Rural, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 50 p.
- Boulet R., 1976.** Notice des cartes de ressources en sols de la Haute-Volta. ORSTOM-Paris; 97 p.
- Boulet R., Leprun J.C., 1969.** Etude pédologique de la Haute Volta. Région Est, Echelle 1/500000 - Centre ORSTOM, Dakar-Hann, Sénégal, 243 p.
- Bouzaiane O., Hassen A., Jedidi N., 2002.** Détermination de la biomasse C et N par la méthode de Fumigation-Extraction dans un sol amendé de résidus organiques. Proceedings of International Symposium on Environmental Pollution Control and Waste Management 7-10 January, Tunis (EPCOWM'2002), pp. 406-416.

- Boyadgiev T.G., 1980.** Création d'un service des sols. Haute-Volta. Etat des connaissances des sols. AG : DP/UPV/74/007 - Rapport technique 1. PNUD/FAO, Rome, 1980, 33 p.
- Boyer J., 1978.** Le calcium et le magnésium dans les régions tropicales humides et sub-humides. Initiation-Documentation Technique n°35, ISBN 2-7099-0494-2, ORSTOM Paris, 173 p.
- Boyer J., 1982.** Les sols ferrallitiques. Tome X : Facteurs de fertilité et utilisation des sols. Doc. Initiations. Documentations techniques, n°52, ORSTOM-Paris, 384 p.
- Brady N.C., Weil R.R., 2002.** The nature and properties of soils. 13 ed., 960 p.
- Braud M., 1972.** Le contrôle de la nutrition du cotonnier par analyse foliaire. 3ème colloque européen et méditerranéen sur le contrôle de la nutrition minérale et de la fertilisation. Budapest, pp. 469-487.
- Braud, M. 1984.** Le diagnostic foliaire du cotonnier. In : Martin-Prevel P., Gagnard J. et Gautier P. (Ed). L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales. Techniques et documentation, Lavoisier. Paris, pp. 559-576.
- Braud M., 1987.** La fertilisation d'un système de culture dans les zones cotonnières soudano-sahéliennes. Supplément à *Cot. Fib. Trop.*, série Doc., Etudes et synthèse, n°8, 35 p.
- Bunasols., 1985.** Etat de connaissance de la fertilité des sols du Burkina Faso. Document technique N°1, 50 p.
- Bunasols., 1987.** Méthodes d'analyse physique et chimique des eaux et du sol. Document technique n°3. Ouagadougou, Burkina Faso, 159 p.
- Callot G., Chamayou H., Maertens C., Salsac L., 1983.** Mieux comprendre les interactions sol-racine. Incidence sur la nutrition minérale. INRA, Paris, ISBN 2-85340-456-0, 325 p.
- Cattan P., Letourmy P., Zagré B., Minougou A., Compaoré E., 2001.** Rendement de l'arachide et du sorgho en rotation sous différents itinéraires techniques au Burkina Faso. *Cah. Agric.* 10(3), pp. 159-172.
- Chaussod R., 1996.** Qualité biologique des sols : évaluation et implication. *Etude et Gestion des Sols*, 3(4), pp. 261-277.
- Chaussod R., Nicolardot B., 1982.** Mesure de la biomasse microbienne dans les sols cultivés. Approche cinétique et estimation simplifiée du carbone facilement minéralisable. *Rev. Ecol. Biol. Sol.* 19(4), pp. 501-512.
- Ciesielski H., Sterckeman T., Baliteau J.Y., Caria G., Goutiers 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. *Étude et Gestion des Sols*, 15(53), pp. 161-170.
- Cleveland C.C., Townsend A.R., Contance B.C., 2004.** Soil microbial dynamics in Costa Rica: seasonal and biogeochemical constraints. *Biotropica*, 36, pp. 184-195.

- Coulibaly A, Bagayoko M, Traore S., Mason S.C., 2000.** Effect of crop residue management and cropping system on pearl millet and cowpea yield. *African Crop Science Journal*, 8 (4), pp. 411-418.
- Cousin I., Vogel H.J., Nicoullaud B., 2004.** Influence de la structure du sol à différentes échelles sur les transferts d'eau. Conséquences d'une réduction du travail du sol. *Étude et Gestion des Sols*, 11(1), pp. 69 – 81.
- CPCS, 1967.** Classification des sols. Travaux de la Commission de Pédologie et de la Cartographie des sols ; 96 p.
- Crozier C.R., Walls B., Hardy D.H., Barnes J.S., 2004.** Response of Cotton to P and K soil fertility gradients in North Carolina. *Journal of Cotton Science*, 8, pp. 130-141.
- CSAO, 2005.** Importance économique et sociale du coton en Afrique de l'Ouest : rôle du coton dans le développement, le commerce et les moyens d'existence. Secrétariat du Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest/OCDE, 72 p.
- Dabin B., 1985.** Les sols tropicaux acides. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* vol. XXI (1), pp. 7-19.
- Dakouo D., 1991.** Maintien de la fertilité dans les systèmes de culture en motorisation intermédiaire. Cas de la zone cotonnière ouest du Burkina Faso. Rapport de synthèse, 49 p.
- Dakouo D., 1994.** Les carences en potassium sur cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) dans les systèmes de culture : cas de la zone cotonnière ouest du Burkina. Thèse de doctorat, option sciences agronomiques, Université Nationale de Côte d'Ivoire, Abidjan, 141 p.
- Deckers J., 1993.** La fertilité du sol et problème d'environnement dans différentes zones écologiques des pays en développement de l'Afrique sub-saharienne. In : Rôle de la fertilisation pour assurer une production durable des cultures vivrières en Afrique Sub-saharienne. Sous la direction de P. Van Reuler et W. H. Prins, pp. 41-58.
- Demoling F., Figueroa D., Baath E., 2007.** Comparison of factors limiting bacterial growth in different soils. *Soil Biol. Biochem.*, 39, pp. 2485-2495.
- Dommergues Y., 1968.** Dégagement tellurique de CO₂. Mesure et signification. *Ann. Inst. Pasteur* 115, pp. 627–656.
- Dridi B., Toumi C. 1999.** Influence d'amendements organiques et d'apport de boues sur les propriétés d'un sol cultivé. *Étude et Gestion des Sols*, 6(1), pp. 7-14.
- Drabo A., 2005.** Evaluation de l'efficacité de deux δ -endotoxines de *Bacillus thuringiensis* (cry1ac et cry2ab) synthétisées par le cotonnier transgénique (coton bt) dans la gestion de la résistance de *Helicoverpa armigera* (hubner) à la deltaméthrine. Mémoire de fin d'études de l'Institut du Développement Rural, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 70 p.
- Elherradi E., Souidi B., Elkacemi K., 2003.** Evaluation de la minéralisation de l'azote de deux sols amendés avec un compost d'ordures ménagères. *Étude et Gestion des Sols*, 10 (3), pp. 139-154.

- Elsass F., 2005.** Minéralogie des argiles de sols : structure, altération, réactivité. Habilitation à Diriger des Recherches, Sciences de la Terre, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 139 p.
- Fabre B., Kockmann F., 2002.** La pratique du chaulage. De la construction du référentiel régional à la démarche de conseil en exploitation. *Étude et Gestion des Sols*, 9(3), pp. 213-224.
- Fallavier P., Babre D., Breysse M., 1985.** Détermination de la capacité d'échange des sols tropicaux acides. *L'Agro. Trop.*, 40, pp. 298–308.
- Fanning D.S., Keramidas V.Z., El-Desoky M.A., 1989.** Micas. In: Minerals in Soil Environment, 2nd ed (J.B. Dixon & S.B. Weed Eds), *Soil Science of America*, Madison, USA, pp. 551-634.
- FAO., 1994.** AEZ in Asia. Proceedings of the regional workshop on Agro-Ecological Zones Methodology and Applications. Bangkok, Thailand, 17-23 November 1991. World Soil Resources, Report 75, Rome, FAO.
- FAO, 2004.** Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable. Bulletin Fao, Engrais et nutrition végétale 13, 144 p.
- FAO, 2006.** World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication. 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome. ISBN 92-5-105511-4, 145 p.
- Gascho G.J., Parker M.B., 2001.** Long-term liming effects on Coastal Plain soils and crops. *Agron. J.*, 93, pp. 1305-1315.
- Genot V., Colinet G., Brahy V., Bock L. 2009.** L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne (adapté du chapitre 4, sol 1 de « L'État de l'Environnement wallon 2006-2007 ». *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 13(1), pp. 121-138.
- Girma K., Teal R.K., Freeman K.W., Boman R.K., Raun W.R., 2007.** Cotton Lint Yield and Quality As Affected by Applications of N, P, and K Fertilizers. *The Journal of Cotton Science* 11, pp. 12–19.
- Guinko S., 1984.** Végétation de la Haute Volta. Thèse de doctorat ès sciences naturelles. Université de Bordeaux III, 318 p.
- Gunapala N., Venette R.C., Ferris H., Scow K.M., 1998.** Effects of soil management history on the rate of organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(14), pp. 1917-1927.
- Hauchart V., 2006.** Le coton dans le Mouhoun (Burkina Faso), un facteur de modernisation agricole : perspectives de développement ? *Agricultures/Cahiers d'études et de recherches francophones*, 15(3), pp. 285-291.
- Hien V., 1990.** Pratiques culturales et évolution de la teneur en azote organique par les cultures dans un sol ferrallitique du Burkina Faso. Thèse de doctorat, INPL, Nancy, 149 p.

- Hien V., Sédogo P.M., Lompo F., 1994.** Gestion de la fertilité des sols au Burkina Faso. Bilan et perspectives pour la promotion de systèmes agricoles durables dans la zone soudano-sahélienne, pp. 47-59.
- Houba, V.J.G., Van Der Lee, J.J., Novozamsky I., 1995.** Soil analysis procedures, other procedures. (Soil and plant analysis, part 5 B), Syllabus' 1995.
- Howard D.D., Essington M.E., Logan J., Roberts R.K., Percell W.M., 2001.** Phosphorus and potassium fertilization of disk-till and no-till Cotton. *The Journal of Cotton Science* 5, pp. 144–155.
- Jacquinet O., 1984.** Sorgho tempéré. In : Martin-Prével P., Gagnard J. et Gautier P. (Eds). L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales. Techniques et documentation, Lavoisier. Paris., pp. 636-642.
- Jenkinson D.S., Powlson D.S., 1976.** The effect of biocidal treatments on metabolism in soil: a method for measuring soil biomass. *Soil Biol. Biochem.* 8, pp. 209–213.
- Kaitibie S., Epplin F. M., Krenzer E.A., Zhang H., 2002.** Economics of lime and phosphorus application for dual-purpose winter wheat production in low-pH soils. *Soil Sci. Am. J.* (94), pp. 1145-1145.
- Kaloga B., 1969.** Etude pédologique de la Haute Volta. Région ouest-nord. Mémoires ORSTOM n°85.
- Kambiré F., 2000.** Effet des techniques d'utilisation de la dent IR.12 sur la production du coton et du maïs dans la zone cotonnière ouest du Burkina Faso. Mémoire de fin d'études. Option Agronomie, I.D.R., Université de Ouagadougou, 73 p.
- Kopittke P.M., Menzies N.W., 2005.** Effect of pH on Na induced Ca deficiency. *Plant and soil*, 269, pp. 119-129.
- Koulibaly B., 2000.** Fertilisation et système de culture en zone cotonnière : cas du Burkina Faso. Commun. à l'atelier sur «La fertilisation et les systèmes de culture en zone cotonnière Ouest-Africaine : cas du Mali, du Burkina Faso et de la Côte-D'Ivoire » Korogho, 6-9 mars, 11 p.
- Koulibaly B., 2005.** Influence du compost, du Burkina phosphate et de la dolomie sur l'efficacité de la fertilisation minérale du cotonnier. Mémoire de DEA en sciences biologiques appliquées. Option Biologie et Ecologie Végétale, Université de Ouagadougou, 48 p.
- Koulibaly B., Dakuo D., Traoré O., Vognan G., 2002.** Introduction de la formule d'apport unique dans la fertilisation du cotonnier au Burkina Faso. Communication présentée au FRSIT 2002, tenu à Ouagadougou du 11 au 18 mai, 17 p.
- Koulibaly B., Traoré O., Dakuo D., Zombré P.N., 2009a.** 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. Agron. Soc. Environ.* 13 (1), pp. 103-111.

- Koulibaly B., Traoré O., Dakuo D., Zombré P.N., 2009b.** Etude de l'effet des apports d'amendements sur les propriétés d'un sol ferrugineux tropical en culture continue dans l'ouest du Burkina Faso. *Etudes et recherches sahéliennes* n° 14 et 15, pp.162-173.
- Koulibaly B., Traoré O., Dakuo D., Zombré P.N., Bondé D., 2010a.** 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), pp. 2120-2132.
- Koulibaly B., Traoré O., Dakuo D., Zombré P.N., Bondé D., 2010b.** Effets de la gestion des résidus de récolte sur les rendements et les bilans culturaux d'une rotation cotonnier-maïs-sorgho au Burkina Faso. *Tropicultura*, 28(3), pp. 184-189.
- Korboulewsky N., Masson G., Bonin G., Massiani C., Prone A., 2001.** Effet d'un apport de compost de boues de station d'épuration dans un sol d'un vignoble du Sud de la France. *Etude et Gestion des Sols*, 8(3), pp. 203-210.
- Kouyaté A.M., Van Damme P., Goyens S., De Neve S., Hofman G., 2007.** Evaluation de la fertilité des sols à *Detarium microcarpum* Guill. & Perr. *Tropicultura*, 25(2), pp. 65-69.
- Lalsaga R., 2007.** Caractérisation de trois types de sols en zone cotonnière ouest du Burkina Faso : impacts des systèmes de culture sur l'acidité des sols. Mémoire de DEA en Sciences appliquées de la terre, de l'eau et des sols. Option pédologie, Université de Ouagadougou, 57 p.
- Landon J.R., 1991.** Booker tropical soil manual. A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics. Oxon, UK: Booker Tate Limited; Harlow, Essex, UK: Longman, 474 p.
- Lendres P., 1990.** Pratiques paysannes et utilisation des intrants en culture cotonnière au Burkina Faso. Mémoire d'ingénieur en Agronomie Tropicale (C.N.A.R.C.), 80 p.
- Léonard C., Sacré J P., Toussaint B., Peeters A., 2001.** Étude de la qualité des sols agricoles de la Province de Luxembourg en vue de la mise en place d'un Observatoire de la Qualité. Convention Ministère de la Région Wallonne, DGA, rapport final, 79 p.
- Lesturgez G., Poss R., Hartmann C., Bourdon E., Noble A., Ratana-Anupap S., 2004.** Roots of *Stylosanthes hamata* create macropores in the compact layer of a sandy soil. *Plant and Soil*, 260, pp. 101-109.
- Lompo F., Sédogo M.P., Hien V., 1995.** Agronomic impact of Burkina phosphate and dolomite limestone. In: H. Gerner & A.U. Mokuwunye (ed). Use of phosphate rock for sustainable agriculture in West Africa. Miscellaneous Fertilizers studies No. 11. Muscle Shoals, USA, IFDC Africa, pp. 54-66.
- Lompo F., Segda Z., Gnankambary Z., Ouandaogo N., 2009.** Influence des phosphates naturels sur la qualité et la biodégradation d'un compost de pailles de maïs. *Tropicultura*, 27(2), pp. 105-109.

- Loué A., 1984.** Méthode de contrôle de la nutrition minérale du maïs. In : Martin-Prevel P., Gagnard J., Gautier P. (Ed). L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales. Techniques et documentation, Lavoisier. Paris, pp. 598-631.
- Malhi S.S., Lemke R., Wang Z.H., Baldev SC., 2006.** Tillage, nitrogen and crop residue effects on yield, nutrient uptake, soil quality and greenhouse gas emissions. *Soil Till Res*, 90(1-2), pp. 171-183.
- Manjaiah K.M., Voroney R.P., Sen U., 2000.** Soil organic carbon stocks, storage profile and microbial biomass under different crop management systems in tropical agricultural ecosystem. *Biol. Fertil. Soils*, 31, pp. 273-278.
- Manlay R.J., Feller C., Swift M.J., 2007.** Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 119, pp. 217–233.
- Martin-Prevel P., Gagnard J., Gautier P., 1984.** L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales. Techniques et Documentation – Lavoisier, 810 p.
- Mbonigaba Muhinda J.J., Nzeyimana I. Bucagu C., Culot M., 2009.** Caractérisation physique, chimique et microbiologique de trois sols acides tropicaux du Rwanda sous jachères naturelles et contraintes à leur productivité *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 13(4), pp. 545-558.
- McLean E.O., 1982.** Soil pH and lime requirement. In: Methods of soil analysis. Part II. Page A.L., Millet R.H., Keeney D.R. (Eds). 2nd Ed., Agronomy Monograph N°9, Madison, WI: *American Society of Agronomy*, pp. 199-223.
- Meng C., Lu X., Cao Z., Hu Z., Ma W., 2004.** Long-term effects of lime application on soil acidity and crop yields on a red soil in Central Zhejiang. *Plant and Soil*, 265(1-2), pp. 101-109.
- Millogo D., 2002.** Diagnostic des modes de gestion de la fertilité des sols dans les systèmes de culture motorisés en zone cotonnière ouest du Burkina Faso. Mémoire de fin d'études. Option Agronomie, I.D.R., Univ. Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 94 p.
- Mills A.J., Fey M.V., 2003.** Declining soil quality in South Africa: effects of land use on soil organic matter and surface crusting. *South African Journal of science*, 99, pp. 429-436.
- Morard P., 1984.** Sorgho tempéré. In : Martin-Prevel P., Gagnard J. et Gautier P. (Ed). L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales. Techniques et documentation, Lavoisier. Paris, pp. 632-635.
- Munsell C., 1975.** Munsell soil color charts. Baltimore, Maryland, USA.
- Namam F., Souidi B., Chiang C., 2001.** Impact de l'intensification agricole sur le statut de la matière organique des sols en zones irriguées semi-arides au Maroc. *Etudes et Gestion des Sols*, 8(4) : 269-277.

- Nyangezi I., 1989.** Etude du maintien de la fertilité des systèmes de culture en motorisation intermédiaire dans l'ouest du Burkina Faso. Mémoire d'Ingénieur du Développement Rural, option agronomie, IDR, Université de Ouagadougou, 50 p.
- OCDE, 2006.** Le coton. Atlas de l'intégration régionale, 20 p.
- Olina Bassala J.P., M'Biandoun M., Ekorong J.A, Asfom P., 2008.** Evolution de la fertilité des sols dans un système cotonnier céréales au Nord Cameroun : diagnostic et perspectives. *Tropicultura*, 26(4), pp. 240-245.
- Olivier R., Njiti C.F., Harmand J.M., 2000.** Analyse de la fertilité acquise suite à des jachères arborées au Nord-Cameroun. *Étude et Gestion des Sols*, 7(4), pp. 287–309.
- Oorts K., Vanluwe B., Merckx R., 2003.** Cation exchange capacity of organic matter fractions in a Ferric Lixisol with different organic matter inputs. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 100, pp. 61-171.
- Ouattara B., 2009.** Analyse-diagnostic du statut organique et de l'état structural des sols des agrosystèmes cotonniers de l'Ouest du Burkina Faso (terroir de Bondoukui). Thèse de doctorat d'Etat, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 186 p.
- Ouattara B., Serpentié G., Ouattara K., Hien V. et Bilgo A., 2000.** Etats structuraux des sols de culture et des jachères en zone cotonnière du Burkina Faso. *In. La jachère en Afrique tropicale.* Ch Floret, R. Pontanier John Libbey Eurotext, Paris, pp. 170-178.
- Ouattara B., Ouattara K., Serpentié G., Mando A., Sédogo M.P., Bationo A., 2006.** Intensity cultivation induced effects on soil organic carbon dynamic in the western cotton area of Burkina Faso. *Nutr Cycl Agroecosyst*; 76, pp. 331-339.
- Ouattara K., 2007.** Improved soil water conservatory managements for cotton-maize rotation system in the Western cotton area of Burkina Faso. Thèse de Doctorat, Swedish University of Agriculture Sciences, UMEA. 50 p.
- Ouédraogo E., Mando A., Zombré N.P., 2001.** Use of compost to improve soil properties and crop productivity under low input agricultural system in West Africa. *Agriculture Ecosystem and Environment*, 84, pp. 259-266.
- Ouédraogo E., Mando A., Stroosnijder L., 2006.** Effects of tillage, organic resources and nitrogen fertiliser on soil carbon dynamics and crop nitrogen uptake in semi-arid West Africa. *Soil Till Res*, pp. 57-67.
- Pallo F.J.P., Thiombiano L., 1989.** Les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions du Burkina Faso : caractéristiques et contraintes pour l'utilisation agricole. *Soltrop* 89, pp. 307-321.
- Pallo F.J.P., Asimi S., Assa A., Sédogo P.M., Sawadogo N., 2006.** Statut de la matière organique des sols de la région sahélienne du Burkina Faso. *Etude et Gestion des Sols*, 13(4), pp. 289-304.
- Pallo F.J.P., Asimi S., Sawadogo N., Sawadogo L., Sédogo P.M., Assa A., 2008.** Statut de la matière organique des sols dans la zone sud soudanienne au Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 12(3), pp. 291-301

- Pallo F.J.P., Sawadogo N., Zombré N.P., Sédogo P.M., 2009.** Statut de la matière organique des sols de la zone nord soudanienne au Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 13(1), pp. 139-142.
- Pernes-Debuysse A., Tessier D., 2002.** Influence de matières fertilisantes sur les propriétés des sols. Cas des 42 parcelles de l'INRA à Versailles. *Etude et Gestion des Sols*, 9(3), pp. 177-186.
- Piéri C., 1989.** Fertilité des terres de savanes. Bilan de 30 ans de recherche et de développement agricoles au Sud du Sahara. CIRAD/Ministère de la Coopération et du Développement, 444 p.
- Pouya T., 2007.** Effets des modes de gestion des résidus de récoltes sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol dans les systèmes de culture à base de cotonnier. Mémoire d'Ingénieur du Développement Rural. Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (U.P.B), 43 p.
- Rabeharisoa R.L., 2004.** Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des hautes terres de Madagascar. Thèse de Doctorat d'Etat es Sciences Naturelles. Université d'Antananarivo, 197 p.
- Rajeswara R.B.R., 2001.** Biomass and essential oil yield of rainfed palmaroso (*Cymbopogon martinii* "Roxb" wats.var motia Buk) supplied with different levels of organic manure and fertilizer nitrogen in semi – arid tropical climate. *Industrial crops and products*, 14(3), pp. 171-178.
- Reiter MS., Reeves D.W., Burmester C.H., 2008.** Cotton Nitrogen Management in a High-Residue Conservation System: Source, Rate, Method, and Timing. *Soil Sci Soc Am J*, 72, pp. 1330-1336.
- Richard L., 1980.** Précisions sur le diagnostic pétiolaire de la nutrition du cotonnier. *Cot. Fib. Trop.*, 35(4), pp. 405-409.
- Richtie G.S.P., 1989.** The chemical behaviour of aluminium, hydrogen and manganese in acid soils. In: Robson A.D. (Editor), *Soil Acidity and Plant Growth*. Academic Press Sydney, Australia, pp 1-60.
- Roose E., Barthès B., 2001.** Organic matter management for soil conservation and productivity restoration in Africa: a contribution from Francophone research. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 61, pp. 159–170.
- Roose E., Barthès B., 2006.** Soil carbon erosion and its selectivity at plot scale in Tropical and Mediterranean regions. In : *Soil erosion and carbon dynamics*. Roose E., Lal R., Feller C., Barthès B., Stewart eds, *Advances in soil sciences*, CRC Press, Boca Raton, Floride, pp. 55-72.
- Roussel O., Bourmeau E., Walter Ch., 2001.** Évaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendements organiques. *Étude et Gestion des Sols*, 8(1), pp. 65-81.

- Rutunga V., Neel H., 2006.** Yield trends in the long-term crop rotation with organic and inorganic fertilisers on Alisols in Mata (Rwanda). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 10 (3), pp. 217–228.
- Sanchez P.A., 2002.** Soil fertility and hunger in Africa. *Science*, 295 (5562), pp. 2019–2020.
- 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.
- Sawadogo H., Bock L., Lacroix D., Zombré N.P., 2008.** Restauration des potentialités de sols dégradés à l'aide du zaï et du compost dans le Yatenga (Burkina Faso). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 12(3), pp. 279-290.
- Sédogo M.P., 1993.** Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture : incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse de Doctorat d'Etat es Sciences Naturelles, FAST/Université Nationale de Côte d'Ivoire, 345 p.
- Segalen P., 1973.** L'aluminium dans les sols. ORSTOM, série initiat. Doc. technique (Paris), n°22, 281 p.
- Sivakumar M.V.K., Gnoumou F., 1987.** Agroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest : Burkina Faso. Bulletin d'information n°23, ICRISAT, Pantcheru, Inde, 192 p.
- Smaling E.M.A., 1993.** Appauvrissement du sol en nutriments de l'Afrique sub-saharienne. In : Rôle de la fertilisation pour assurer une production durable des cultures vivrières en Afrique Sub-saharienne. Van Reuler, Prins W.H., pp. 59-76.
- Soltner D., 2005.** Les bases de la production végétale. Tome 1. Le sol et son amélioration. Collection Sciences et techniques Agricoles, 24^e éd., ISBN : 2-907710-00-1, 471 p.
- Somé L., Y. Dembélé, 1996.** Péjoration pluviométrique au Burkina Faso: impacts sur les productions agricoles. In : Actes du 2^e Forum National de la Recherche Scientifique et des Innovations Technologiques (FRSIT) à Ouagadougou. Thème : la recherche scientifique face aux problèmes de l'environnement, Tome 2. Les communications scientifiques, pp. 81-90.
- Somé D., Zombré P. N., Zombré G., Macauley H.R., 2004.** Impact de la technique du zaï sur la production du niébé et sur l'évolution des caractéristiques chimiques des sols très dégradés (*zipellés*) du Burkina Faso. *Sécheresse* 15(3), pp. 263-269.
- Somé N.A., Traoré K., Traoré O., Tassebedo M., 2007.** Potentiel des jachères artificielles à *Andropogon* spp. dans l'amélioration des propriétés chimiques et biologiques des sols en zone soudanienne (Burkina Faso). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 11(3), pp. 245–252.
- Son G., Badraoui M., Kambire F., 2004.** Influence de la pluviométrie sur l'efficacité en rendement coton-graine de cinq systèmes techniques de préparation du sol dans l'Ouest du Burkina Faso. Communication au FRSIT 2004, Ouagadougou, 13 p.

- Soumaré M., Demeyer A., Tack F.M. G., Verloo M.G., 2000.** Chemical characteristics of Malian and Belgian solid waste composts. *Med. Fac. Landbouw. Univ. Gent*, 65, pp. 79-83.
- Stevens G., Gladbach T., Motavalli P., Dunn D., 2005.** Soil calcium, magnesium ratios and lime recommendations for cotton. *The Journal of Cotton Science* 9, pp. 65–71.
- Takata Y., Funakawa S., Yanai J., Mishima A., Akshalov K., Ishida N., Kosaki T., 2008.** Influence of crop rotation system on the spatial and temporal variation of the soil organic carbon budget in northern Kazakhstan. *Soil Science and Plant Nutrition* 54, pp. 159–171.
- Tchienkoua, Zech M.W., 2000.** The effect of cultivation and fallowing on phosphorus pools on ferralitic soils in central Cameroon. In : *La jachère en Afrique tropicale*. Ch Floret, R. Pontanier John Libbey Eurotext, Paris, pp. 204-211.
- Tejada M., Gonzalez J.L., 2007.** Application of different organic wastes on soil properties and wheat yield. *Agron. J.*, 99, pp. 1597-1606.
- Terrible M.P.B., 1982.** Occupation du sol en Haute-volta : son évolution entre 1952-56 et 1975, 31 p.
- Tokeshi H., Alves M.C., Sanchez A.B., Harada D.Y., 1997.** Control of *Sclerotinia sclerotiorum* with effective microorganisms. *Summa Phytopathologica*, 23, pp. 146-154.
- Traoré B., 1995.** Fertilisation du cotonnier au Mali : complémentarité de trois méthodes de diagnostic agronomique. In : *Interprétation agronomique de données de sol : un outil pour la gestion des sols et le développement agricole*. Séminaire Bunasols/Inera/AB-DLO, Ouagadougou, 14-16 mars. AB-DLO Thema's, AB-DLO, Haren, pp. 183-195.
- Traoré O., Somé N.A., Traoré K., Somda K., 2007 a.** Effect of land use change on some important soil properties in cotton-based farming system in Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 1(1), pp. 7-14.
- Traoré O., Koulibaly B., Dakuo D., 2007 b.** Effets comparés de deux formes d'engrais sur les rendements et la nutrition minérale en zone cotonnière au Burkina Faso. *Tropicicultura* 25(4), pp. 200-203.
- Trinh S., 1976.** L'aluminium échangeable dans les sols acides de quelques pays d'Afrique et de Madagascar. *Cah. ORSTOM, sér Pédol.*, XIV(3), pp. 207-218.
- Vagën T.G., Lal R., Singh B.R., 2005.** Soil carbon sequestration in Sub-saharan africa: a review. *Land Degrad. Develop.* 16, pp. 53–71.
- Van Reeuwijk L.P., 1993.** Procedures for Soil Analyses. Technical Paper No. 9 . Van Fourth Edition. Reeuwijk (ed). International Soil Reference and Information Centre (ISRIC).
- Vanlauwe B., Diels J., Sanginga N., Merckx R., 2005.** Long-term integrated soil fertility management in South-western Nigeria: Crop performance and impact on the soil fertility status. *Plant and soil*. 273(1-2), pp. 337-354.

- Velthof GL., Beuichem Van M.L., Raijmakers W.M.F., Janssen B.H., 1998.** Relation between availability indices and plant uptake of nitrogen and phosphorus from organic products. *Plant and soil*, 200, pp. 215-226.
- Vullioud P., Mercier E., Ryser J.P., 2004.** Bilan de 40 ans d'essai portant sur différentes fumures organiques (Changins 1963-2003). *Revue Suisse d'agriculture*, 36(2), pp. 43-51.
- Walkley A., Black J. A., 1934.** An examination of the Detjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromatic acid titration method. *Soil Science* 37, pp. 29-38.
- Warin A., Bernaerdt R., Delcarte E., Maesen P., Naud J., Marcoen J.M., 2004.** Développement d'un système harmonisé de surveillance de la qualité des terres agricoles en Région wallonne anticipant la future directive européenne sur les sols. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 8(2), pp. 69-82.
- Wei X., Hao M., Shao M., Gale W.J., 2006.** Change in soil properties and availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization. *Soil Till Res*, 91(1-2), pp. 120-130.
- Whalen J.K., Chang C., Carefoot J.P., 2000.** Cattle manure amendments can increase the pH of acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, pp. 962-966.
- Wolkoff B., Faure P., Dubroeuq D., Vinnot M., 1999.** Estimation des stocks de carbone du Bénin. *Etudes et Gestion des Sols*, 6(2), pp. 115-130.
- Wright R.J., 1989.** Soil aluminium toxicity and plant growth. *Soil Sci. Plant. Anal.*, 20, pp. 1479-1497.
- Yeboua K., Ballo K., 2000.** Caractéristiques chimiques du sol sous palmeraie. *Cahiers Agricultures*, 9(1), pp. 73-76.
- Yemefack M., Nounamo L., 2000.** Dynamique des sols et durée optimale des jachères naturelles au sud du Cameroun. In : CH Floret et R. Pontanier (eds). *La jachère en Afrique tropicale : rôles, aménagements, alternatives*. John Libbey Eurotext, Paris, France, pp. 135-141.
- Yemefack M., Nounamo L., Njomgang R., Bilong P., 2004.** Influence des pratiques agricoles sur la teneur en argile et autres propriétés agronomiques d'un sol ferrallitique au sud du Cameroun. *Tropicultura*, 22(1), pp. 3-10.
- Yoni M., Hien V., Abbadie L., Serpantié G., 2005.** Dynamique de la matière organique du sol dans les savanes soudaniennes du Burkina Faso. *Cahiers Agricultures*, 14(6): 525-532.
- Zia-ul-hassan, Arshad M., 2008.** Evaluating factors affecting cotton tolerance to potassium deficiency stress using path analysis. *Int. J. Agri. Biol.*, 10, pp. 511-516.
- Zombré N.P., 2003.** Les sols très dégradés "zipella" du centre nord du Burkina Faso : dynamique, caractéristiques morpho-bio-pédologiques et impacts des techniques de restauration. Thèse de doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université de Ouagadougou, 374 p.

Zombré P.N., 2006. Variation de l'activité biologique dans les zipella (sols nus) en zone subsahélienne du Burkina Faso et impact de la technique du zai (techniques des poquets). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 10(2), pp. 139–148.

Zougmore R., Zida Z., Kambou N.F., 2003. Rôle of nutrient amendments in the success of half-moon soil and water conservation practice in semi arid Burkina Faso. *Soil and tillage Research*, 72, pp. 56-65.

Zougmore R., Ouattara K., Mando A., Ouattara B., 2004. Rôle des nutriments dans le succès des techniques de conservation des eaux et des sols (cordons pierreux, bandes enherbées, zai et demi-lunes) au Burkina Faso. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 15(1), pp. 41-48.

ANNEXES

ANNEXE 1. Caractéristiques physico-chimiques et hydriques du sol avant les apports des amendements (Farako-bâ, 2004)

ANNEXE 2. Pluviométrie et nombre de jours de pluie par an à Boni de 1982 à 2006.

ANNEXE 3. Description morphologique des sols bruns eutrophes (cambisols) de Boni

ANNEXE 4. Description morphologique des sols ferrugineux (lixisols) de Dohoun

ANNEXE 5. Description morphologique des sols ferrallitiques (ferralsols) sableux de Balla

ANNEXE 6. Teneurs en calcium et en magnésium des sols

ANNEXE 7. Corrélations entre les variables chimiques des sols bruns eutrophes (cambisols) du site de Boni

ANNEXE 8. Corrélations entre les variables chimiques des sols ferrugineux (lixisols) du site de Dohoun

ANNEXE 9. Corrélations entre les variables chimiques des sols ferrallitiques (ferralsols) du site de Balla

ANNEXE 1. Caractéristiques physico-chimiques et hydriques du sol avant les apports des amendements (Farako-bâ, 2004)

Caractéristiques	Profondeurs		
	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
Argile (g kg ⁻¹)	159	340	403
Limon (g kg ⁻¹)	712	538	474
Sable (g kg ⁻¹)	129	121	123
C total (g kg ⁻¹)	4,80	6,10	5,60
N total (g kg ⁻¹)	0,60	0,60	0,60
P total (mg kg ⁻¹)	99,20	77,15	66,10
P assimilable Bray I (mg kg ⁻¹)	0,72	0,79	0,69
K disponible (mg kg ⁻¹)	23,50	23,50	46,50
Ca ²⁺ (cmol ⁺ kg ⁻¹)	1,93	2,87	3,37
Mg ²⁺ (cmol ⁺ kg ⁻¹)	0,34	0,76	0,81
K ⁺ (cmol ⁺ kg ⁻¹)	0,17	0,12	0,12
Na ⁺ (cmol ⁺ kg ⁻¹)	0,04	0,05	0,05
Somme des bases (cmol ⁺ kg ⁻¹)	2,48	3,80	4,34
C.E.C (cmol ⁺ kg ⁻¹)	4,50	6,32	6,45
Taux de saturation (%)	55	60	67
pH eau	5,33	5,38	5,62
pH KCl	4,01	4,02	4,23
Al ³⁺ (cmol ⁺ kg ⁻¹)	0,40	0,38	0,15
H ⁺ (cmol ⁺ kg ⁻¹)	0,55	0,23	0,25
pF 2,5	11,32	26,64	22,55
pF 3,0	6,87	14,57	17,95
pF 4,2	5,24	11,66	14,70
pF2,5 - pF4,2	6,09	14,99	7,85

ANNEXE 2. Pluviométrie et nombre de jours de pluie par an à Boni de 1982 à 2006.

Années	Pluviométrie mensuelle (mm)						Cumul (mm/an)	Jours de pluie/an
	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre		
1982	125	109	153	271	91	59	868	62
1983	66	103	194	115	162	60	728	52
1984	132	77	104	123	314	62	835	67
1985	123	132	445	214	139	22	1098	53
1986	125	105	242	209	255	21	988	66
1987	57	153	232	243	132	17	840	49
1988	27	153	250	352	280	53	1204	58
1989	59	107	215	320	197	50	1057	67
1990	51	106	154	177	176	77	841	57
1991	161	142	140	175	87	76	855	61
1992	66	142	201	159	208	38	823	55
1993	19	67	169	351	154	62	831	50
1994	82	201	285	253	193	108	1209	71
1995	189	215	127	234	137	22	1006	63
1996	115	113	187	346	205	77	1102	63
1997	27	169	187	188	220	182	1015	68
1998	188	110	186	249	209	14	970	59
1999	112	57	251	425	232	64	1157	75
2000	67	117	122	218	193	64	837	54
2001	134	285	345	261	282	33	1353	58
2002	38	143	109	245	154	69	758	42
2003	73	150	147	234	241	22	924	59
2004	110	85	283	176	92	16	781	46
2005	79	101	123	150	240	47	840	40
2006	58	143	131	267	282	107	987	57
Maximum	189	285	445	425	314	182	1353	75
Minimum	19	57	104	115	87	14	728	40
Moyenne	91 ± 48	131 ± 49	199 ± 80	238 ± 76	195 ± 63	57 ± 37	956 ± 162	58 ± 9

ANNEXE 3. Description morphologique des sols bruns eutrophes (cambisols) de Boni

ANNEXE 3 a. Profil de sol brun eutrophe (cambisol) sous jachère

Auteurs : Koulibaly B., Zombré N.P. et Lalsaga R.

Date : 8/12/2006

Classification du sol

CPCS (1967) : Sol brun eutrophe ferruginisé

WRB (2006) : Cambisol eutrique

Environnement du profil

Longitude : 003°23 638'

Latitude : 11°32 466' N

Topographie : plat

Drainage : bon

Roche-mère : Schiste

Végétation : jachère à *Acacia gourmaensis*, *Acacia seyal*, *Balanites aegyptiaca*, avec un tapis herbacé à *Andropogon pseudapricus*.

Description morphologique du profil

- 0-12 cm Brun fort (10YR5/6) à l'état sec et brun sombre jaunâtre (10YR4/6) à l'état humide; limono argileux; 2% de concrétions ferro-manganifères; structure fortement développée en éléments grossiers et moyens, polyédriques sub-angulaires; consistance très dure; pores peu nombreux, très fins et moyens; racines peu nombreuses, sub-horizontales, fines et moyennes, de taille millimétrique; activité biologique assez bien développée; transition nette, limite régulière.
- 12-30 cm Brun jaunâtre (10YR5/6) à l'état sec et brun sombre jaunâtre (10YR4/6) à l'état humide; limono argileux; 15% de concrétions ferro-manganifères; structure moyennement développée en éléments fins et moyens, polyédriques sub-angulaires; consistance friable; nombreux pores fins, moyens et larges; nombreuses racines, sub-horizontales, fines, moyennes et grosses, de taille millimétrique et centimétrique; activité biologique assez bien développée; transition progressive, limite irrégulière.
- 30-60 cm Brun jaunâtre (10YR5/6) à l'état sec et brun sombre jaunâtre (10YR4/6) à l'état humide; limono argileux; 10% de concrétions ferrugineuses, ferro-manganifères; structure moyennement développée en éléments fins et moyens, polyédriques sub-angulaires; consistance friable; pores peu nombreux très fins et moyens; quelques fines racines, sub-horizontales, de taille millimétrique; activité biologique moyennement développée; transition diffuse, limite graduelle.
- 60-120 cm Brun jaunâtre (10YR5/6) à l'état sec et brun sombre jaunâtre (10YR4/6) ; argilo limoneux; 5% de concrétions ferrugineuses; structure faiblement développée en éléments moyens et fins, polyédriques sub-angulaires; consistance peu dure; quelques faces de pression; pores peu nombreux très fins et fins; quelques fines racines sub-horizontales, de taille millimétrique; activité biologique faiblement développée.

ANNEXE 3 b. Profil de sol brun eutrophe (cambisol) sous culture attelée

Auteurs : Koulibaly B., Zombré N.P. et Lalsaga R.

Date : 8/12/2006

Classification du sol

CPCS (1967) : Sol brun eutrophe vertique

WRB (2006) : Cambisol vertique

Environnement du profil

Longitude : 003°23 640'W

Latitude : 11°32 626'N

Topographie : plat

Drainage : bon

Roche-mère : schiste

Végétation : culture de coton

Description morphologique du profil

- 0-16 cm Brun jaunâtre (10YR5/4) à l'état sec et brun sombre (10YR4/4) à l'état humide; limono argileux ; 5% de graviers de quartz; structure fortement développée en éléments grossiers, moyens et fins, polyédriques subangulaires; consistance dure; nombreux pores fins, moyens et larges; racines sub-horizontales, fines et peu nombreuses, de taille millimétrique; activité biologique assez bien développée; transition nette, limite irrégulière.
- 16-40 cm Brun sombre (7,5YR4/4) à l'état sec et brun sombre (7,5YR4/4) à l'état humide; argilo limoneux; structure moyennement développée en éléments grossiers, moyens et fins, polyédriques sub-angulaires; consistance dure; quelques faces de pression; nombreux pores fins, moyens et larges; quelques fines racines, sub-verticales, de taille millimétrique; activité biologique assez bien développée; transition graduelle, limite plus ou moins régulière.
- 40-75 cm Brun sombre jaunâtre (10YR4/6) à l'état sec et brun jaunâtre sombre (10YR3/4) à l'état humide avec quelques taches brunes ; argilo limoneux ; structure faiblement développée en éléments grossiers et moyens, polyédriques angulaires; consistance dure; quelques faces de pression; nombreux pores fins et très fins; racines absentes; activité biologique moyennement développée; transition nette, limite régulière.
- 75-120 cm Brun olive clair (2,5Y5/4) à l'état sec et brun sombre grisâtre (2,5Y4/2) avec quelques taches brunes ; argile ; structure faiblement développée en éléments grossiers, moyens et fins, polyédriques angulaires ; consistance peu dure ; nombreuses faces de pression ; nombreux pores fins et très fins ; racines absentes ; activité biologique faiblement développée.

ANNEXE 4. Description morphologique des sols ferrugineux (lixisols) de Dohoun

ANNEXE 4 a. Profil de sol ferrugineux (lixisol) sous jachère

Auteurs : Koulibaly B., Zombré N.P. et Lalsaga R.

Date : 8/12/2006

Classification du sol

CPCS (1967) : Sol ferrugineux tropical lessivé induré peu profond

WRB (2006) : Lixisol

Environnement du profil

Longitude : 003°36 263' W

Latitude : 11°31 549' N

Topographie : plat

Drainage : normal jusqu'à 30 cm

Roche-mère : Andésite

Végétation : jachère sous savane arborée claire à *Piliostigma reticulatum*, *Combretum glutinosum*, avec un tapis herbacé à *Andropogon pseudapricus*.

Description morphologique du profil

- 0-6 cm Brun (10YR5/3) à l'état sec et brun sombre très sombre grisâtre (10YR3/2) à l'état humide; limoneux (limon fin); 20% de graviers ferrugineux et de quartz; structure fortement développée en éléments moyens, fins et grossiers, polyédriques sub-angulaires; consistance peu dure; nombreux pores fins, moyens et larges; nombreuses racines sub-horizontales, fines et moyennes, de taille millimétrique; activité biologique bien développée; transition nette, limite régulière.
- 6-15 cm Brun jaunâtre (10YR5/4) à l'état sec et brun jaunâtre sombre (10YR3/4) à l'état humide; limono argileux; 30% de graviers ferrugineux et de quartz; structure fortement développée en éléments fins et moyens, polyédriques sub-angulaires; consistance friable; nombreux pores fins, moyens et larges; quelques fines, moyennes et grosses racines sub-horizontales, de taille millimétrique et décimétrique; activité biologique assez bien développée; transition graduelle, limite irrégulière.
- 15-30 cm Brun très pâle (10YR7/4) à l'état sec et brun jaunâtre (10YR5/4) à l'état humide avec des taches gris clair; argilo limoneux; 45% de graviers ferrugineux et de quartz; structure moyennement développée, polyédriques sub-angulaires; consistance peu dure; nombreux pores très fins, fins, moyens et larges; racines sub-verticales, peu nombreuses fines et moyennes, de taille millimétrique; activité biologique assez bien développée; transition nette, limite irrégulière.
- 30-120 cm Cuirasse vacuolaire discontinue.

ANNEXE 4 b. Profil de sol ferrugineux (lixisol) sous culture attelée

Auteurs : Koulibaly B., Zombré N.P. et Lalsaga R.

Date : 8/12/2006

Classification du sol

CPCS (1967) : Sol ferrugineux tropical lessivé induré peu profond

WRB (2006) : Lixisol

Environnement du profil

Longitude : 003°36 286' W

Latitude : 11°31 691' N

Topographie : plat

Drainage : normal

Roche-mère : Andésite

Végétation : champ de coton

Description morphologique du profil

- 0-6 cm Brun (10YR5/3) à l'état sec et brun sombre (10YR3/3) à l'état humide; limono sableux; 15% de graviers ferrugineux et de quartz; structure fortement développée en éléments moyens, fins et grossiers, polyédriques sub-angulaires; consistance friable; nombreux pores fins, moyens et larges; nombreuses racines sub-horizontales, fines et moyennes, de taille millimétrique; activité biologique assez bien développée ; transition nette, limite régulière.
- 6-23 cm Brun jaunâtre (10YR5/4) à l'état sec et brun sombre jaunâtre (10YR4/4) à l'état humide; limono argileux; 30% de graviers ferrugineux et de quartz; structure fortement développée en éléments moyens, fins et grossiers, polyédriques sub-angulaires; consistance friable; nombreux pores fins, moyens et larges; quelques fines racines sub-horizontales, de taille millimétrique; activité biologique assez bien développée; transition nette, limite distincte régulière.
- 23-39 cm Brun jaunâtre clair (10YR6/4) à l'état sec et brun sombre (10YR4/3) à l'état humide avec des taches brun jaune; argile limoneuse; 75% de graviers ferrugineux et de quartz; structure fortement développée, polyédriques sub-angulaires; consistance friable; nombreux pores fins et très fins; racines rares, de taille millimétrique, sub-verticales; activité biologique moyennement développée; transition nette, limite irrégulière.
- 39-90 cm Cuirasse fortement indurée avec quelques agrégats argileux.

ANNEXE 4 c. Profil de sol ferrugineux (lixisol) sous culture motorisée

Auteurs : Koulibaly B., Zombré N.P. et Lalsaga R.

Date : 8/12/2006

Classification du sol

CPCS (1967) : Sol ferrugineux tropical lessivé hydromorphe à taches et concrétions

WRB (2006) : Lixisol

Environnement du profil

Longitude : 003°37 690' W

Latitude : 11°34 449' N

Topographie : plat

Drainage : pauvre

Roche-mère : Andésite

Végétation : champ de coton

Description morphologique du profil

- 0~8-15 cm Brun pâle (10YR6/3) à l'état sec et brun sombre (10YR4/3) à l'état humide; sablo limoneux; structure fortement développée en éléments grossiers, moyens et fins, polyédriques sub-angulaires; consistance friable; nombreux pores fins, moyens et larges; quelques fines et moyennes racines sub-horizontales, de taille millimétrique; activité biologique assez bien développée; transition nette, limite irrégulière.
- 8~15-30 cm Brun pâle (10YR6/3) à l'état sec et brun sombre (10YR3/3) à l'état humide; limono argilo-sableux; 2% de concrétions ferrugineuses, ferro-manganifères; structure fortement développée en éléments moyens, polyédriques sub-angulaires; consistance dure; nombreux pores fins, moyens et larges; quelques fines racines sub-horizontales, de taille millimétrique; activité biologique assez bien développée; transition nette, limite irrégulière.
- 30-48 cm Brun très pâle (10YR7/3) à l'état sec et brun (10YR5/3) à l'état humide avec des taches gris clair; argilo sableux; 20% de concrétions ferrugineuses et de graviers de quartz; structure moyennement développée en éléments grossiers, moyens et fins, polyédriques sub-angulaires; consistance peu dure; nombreux pores fins, moyens et larges; racines rares, de taille millimétrique, sub-verticales; activité biologique moyennement développée; transition graduelle, limite progressive.
- 48-80 cm Gris clair (10YR7/2) à l'état sec et brun jaunâtre (10YR5/2) avec des taches brun; 70% de concrétions ferrugineuses; structure moyennement développée en éléments fins et moyens, polyédriques sub-angulaires; consistance peu dure; nombreux pores fins, moyens et larges; racines absentes; activité biologique moyennement développée; transition diffuse, limite plus ou moins régulière.
- 80-120 cm Gris clair (10YR7/2) à l'état sec et gris brunâtre clair (10YR6/2) à l'état humide avec des taches brun; argileux; 60% de concrétions ferrugineuses; structure moyennement développée en éléments fins et moyens, polyédriques sub-angulaires; consistance peu dure; nombreux pores fins et très fins; racines absentes; activité biologique moyennement développée.

ANNEXE 5. Description morphologique des sols ferrallitiques (ferralsols) sableux de Balla

ANNEXE 5 a. Profil de sol ferrallitique (ferralsol) sous jachère

Auteurs : Koulibaly B., Zombré N.P. et Lalsaga R.

Date : 9/12/2006

Classification du sol

CPCS (1967) : Sol ferrallitique faiblement désaturé induré moyennement profond

WRB (2006) : Ferralsol

Environnement du profil

Longitude : 004°07 088' W

Latitude : 11°29 902' N

Topographie : plat

Drainage : modéré

Roche-mère : Grès

Végétation : jachère sous savane arborée à *Parkia biglobosa*, *Anona senegalensis*, *Piliostigma reticulatum*, *Pennisetum pedicellatum*

Description morphologique du profil

- 0-6 cm Gris brunâtre clair (10YR6/2) à l'état sec et brun sombre grisâtre (10YR4/2) à l'état humide; sablo limoneux; structure fortement développée en éléments moyens, fins et grossiers, polyédriques sub-angulaires; consistance peu dure; nombreux pores fins et moyens; nombreuses racines horizontales, fines et moyennes, de taille millimétrique; activité biologique moyennement développée; transition nette, limite régulière.
- 6-28 cm Brun pâle (10YR6/3) à l'état sec et brun sombre (10YR4/3) à l'état humide; sablo limoneux; structure moyennement développée en éléments moyens fins et grossiers, polyédriques sub-angulaires; consistance peu dure; nombreux pores fins et moyens; nombreuses racines sub-horizontales, fines, moyennes et grosses, de taille millimétrique; activité biologique assez bien développée; transition graduelle, limite plus ou moins régulière.
- 28~40-50 cm Jaune rougeâtre (7,5YR6/6) à l'état sec et brun sombre (7,5YR4/3) à l'état humide; argilo sableux; 2% de concrétions ferrugineuses et graviers de quartz; structure faiblement développée en éléments moyens, fins et grossiers, polyédriques sub-angulaires; consistance dure; nombreux pores fins et moyens; racines peu nombreuses sub-horizontales, fines et moyennes, de taille millimétrique; activité biologique moyennement développée; transition nette, limite irrégulière.
- 40~50-68 cm Jaune rougeâtre (7,5YR6/6) à l'état sec et brun fort (7,5YR4/6) à l'état humide; argilo sableux; 50% de concrétions ferrugineuses; structure fortement développée en éléments fins et moyens, polyédriques sub-angulaires; consistance friable; nombreux pores fins; quelques fines racines sub-verticales, de taille millimétrique; activité biologique moyennement développée; transition graduelle, limite plus ou moins régulière.
- 68-130 cm Jaune rougeâtre (7,5YR6/6) à l'état sec et brun sombre (7,5YR4/4) à l'état humide; argile; 90% de concrétions ferrugineuses; structure fortement développée en éléments fins et moyens, polyédriques sub-angulaires; consistance dure; nombreux pores fins; activité biologique moyennement développée.

ANNEXE 5 b. Profil de sol ferrallitique (ferralsol) sous culture attelée

Auteurs : Koulibaly B., Zombré N.P. et Lalsaga R.

Date : 9/12/2006

Classification du sol

CPCS (1967) : Sol ferrallitique moyennement désaturé, induré profond

WRB (2006) : Ferralsol

Environnement du profil

Longitude : 004°07 149' W

Latitude : 11°29 998' N

Topographie : plat

Drainage : normal jusqu'à 50 cm, limité en profondeur

Roche-mère : Grès

Végétation : champ de coton

Description morphologique du profil

0-10 cm Brun pâle (10YR6/3) à l'état sec et brun sombre (10YR4/3) à l'état humide; sableux; structure fortement développée en éléments grossiers, moyens et fins, polyédriques sub-angulaires; consistance friable; nombreux pores fins; moyens et larges ; quelques racines fines, de taille millimétrique, sub-horizontales; activité biologique moyennement développée; transition nette, limite irrégulière.

10-24 cm Jaune brunâtre (10YR6/6) à l'état sec et brun sombre jaunâtre (10YR4/6) à l'état humide; sablo argileux; 2% de concrétions ferrugineux et graviers de quartz; structure moyennement développée en éléments grossiers, moyens et fins, polyédriques sub-angulaires; consistance peu dure; nombreux pores moyens, larges et fins; nombreuses racines fines, moyennes et grosses, de taille millimétrique, sub-verticales; activité biologique moyennement développée; transition nette, limite irrégulière.

24-55 cm Jaune rougeâtre (7,5YR6/6) à l'état sec et brun fort (7,5YR4/6) à l'état humide; argilo limoneux; 20% de concrétions ferrugineuses et graviers de quartz; structure faiblement développée en éléments grossiers, moyens et fins, polyédriques sub-angulaires; consistance peu dure; nombreux pores très fins, fins et moyens; racines rares, de taille millimétrique, verticales; activité biologique moyennement développée; transition graduelle, limite irrégulière.

55-90cm Jaune rougeâtre (7,5YR6/6) à l'état sec et brun jaunâtre (7,5YR5/6) à l'état humide avec quelques taches gris clair; argilo sableux; 50% de concrétions ferrugineuses et graviers de quartz; structure faiblement développée en éléments fins, moyens et grossiers, polyédriques sub-angulaires; consistance dure; nombreux pores fins, moyens et larges; racines absentes ; transition nette, limite régulière.

90-120 cm Cuirasse ferrugineuse

ANNEXE 5 c. Profil de sol ferrallitique (ferralsol) sous culture motorisée

Auteurs : Koulibaly B., Zombré N.P. et Lalsaga R.

Date : 9/12/2006

Classification du sol

CPCS (1967) : Sol ferrallitique moyennement désaturé

WRB (2006) : Ferralsol

Environnement du profil

Longitude : 004°03 910' W

Latitude : 11°29 640' N

Topographie : quasi-plat

Drainage : normal

Roche-mère : Grès

Végétation : champ de coton

Description morphologique du profil

- 0-15 cm Brun pâle (10YR6/3) à l'état sec et brun sombre jaunâtre (10YR4/4) à l'état humide; sableux; structure fortement développée en éléments grossiers, moyens et fins, polyédriques sub-angulaires; consistance friable; nombreux pores fins, moyens et larges; quelques fines racines, de taille millimétrique, sub-horizontales; activité biologique moyennement développée; transition nette, limite irrégulière.
- 15-30 cm Brun jaunâtre (10YR5/4) à l'état sec et brun jaunâtre sombre (10YR3/4) à l'état humide; sablo argileux; structure fortement développée en éléments grossiers, moyens et fins, polyédriques sub-angulaires; consistance peu dure; nombreux pores fins, moyens et larges; quelques fines, moyennes et grosses racines, de taille millimétrique, sub-horizontales; activité biologique assez bien développée; transition nette, limite irrégulière.
- 30-50 cm Jaune rougeâtre (7,5YR6/6) à l'état sec et brun sombre (7,5YR4/4) à l'état humide; argileux; 2% de concrétions ferrugineuses; structure moyennement développée en éléments moyens, fins et grossiers, polyédriques sub-angulaires; consistance dure; nombreux pores très fins, fins, moyens et larges; quelques fines et grosses racines, de taille millimétrique et centimétrique, sub-verticales; activité biologique assez bien développée; transition graduelle, limite plus ou moins régulière.
- 50-80 cm Jaune rougeâtre (7,5YR6/6) à l'état sec et brun fort (7,5YR4/6) à l'état humide avec quelques taches jaune brun; 15% de concrétions ferrugineuses; structure moyennement développée en éléments fins, moyens et grossiers, polyédriques sub-angulaires; consistance dure; nombreux pores fins, moyens et larges; racines rares très fines, de taille millimétrique, sub-verticales; activité biologique moyennement développée; transition graduelle, limite plus ou moins régulière.
- 80-130 cm Jaune rougeâtre (7,5YR6/6) à l'état sec et brun fort (7,5YR4/6) à l'état humide avec quelques taches gris clair; argilo sableux; vingt pour cent de concrétions ferrugineuses friables; structure faiblement développée en éléments fins, moyens et grossiers, polyédriques sub-angulaires; consistance dure; nombreux pores fins; absence de racines; activité biologique assez bien développée.

ANNEXE 6. Teneurs en calcium et en magnésium des sols

Types de sol	Modes d'exploitation des terres	Couches cm	Ca		Mg		Ca/Mg
			Ca total	disponible	Mg total	disponible	
			mg kg ⁻¹				
Brun eutrophe (cambisol) Boni	Sol sous jachère	0-12	2654	1596	2429	380	1,09
		12-30	2041	1705	2092	357	0,98
	Sol sous culture attelée	0-16	3521	2110	2541	561	1,39
		16-40	3088	2420	4070	717	0,76
Ferrugineux (lixisol) Dohoun	Sol sous jachère	0-6	1276	871	813	154	1,57
		6-15	893	738	1546	123	0,58
		15-30	791	722	968	119	0,82
	Sol sous culture attelée	0-6	3521	1632	1467	175	2,40
		6-23	1454	1108	1397	98	1,04
	Sol sous culture motorisée	23-39	1531	1260	1718	109	0,89
		0-8	357	304	255	41	1,40
		8.-15	638	520	356	70	1,79
Ferrallitique (ferralsol) Balla	Sol sous jachère	0-6	185	179	311	65	0,59
		6-28	88	77	303	54	0,29
		28-40	148	128	669	84	0,22
	Sol sous culture attelée	0-10	191	179	262	35	0,73
		10-24	261	230	594	69	0,44
	Sol sous culture motorisée	24-55	314	281	728	101	0,43
		0-15	255	217	255	32	1,00
		15-30	315	281	464	71	0,68

ANNEXE 7. Corrélations entre les variables chimiques des sols bruns eutrophes (cambisols) du site de Boni

Variables	C total	N total	P total	P ass	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SBE	C.E.C	V (%)	Al ³⁺	H ⁺	pH eau	pH KCl	AE
C total	1															
N total	0,995	1														
P total	-0,127	-0,142	1													
P ass	0,168	0,132	0,137	1												
Ca ²⁺	-0,409	-0,409	-0,028	-0,141	1											
Mg ²⁺	-0,250	-0,261	0,303	-0,254	0,766	1										
K ⁺	0,069	0,067	-0,475	0,062	0,613	0,564	1									
Na ⁺	-0,259	-0,228	-0,406	-0,313	-0,101	-0,047	0,247	1								
SBE	-0,393	-0,395	0,010	-0,159	0,995	0,823	0,635	-0,090	1							
C.E.C	-0,408	-0,408	-0,018	-0,210	0,985	0,835	0,659	0,010	0,993	1						
V (%)	-0,357	-0,365	0,190	-0,022	0,930	0,769	0,469	-0,382	0,932	0,885	1					
Al ³⁺	0,371	0,406	-0,671	-0,086	-0,058	-0,104	0,513	0,234	-0,057	-0,023	-0,221	1				
H ⁺	-0,126	-0,105	-0,212	0,105	-0,080	-0,300	0,064	0,560	-0,111	-0,052	-0,300	-0,017	1			
pH eau	-0,216	-0,216	0,164	-0,073	0,835	0,715	0,428	-0,456	0,840	0,797	0,888	0,020	-0,400	1		
pH KCl	-0,055	-0,050	-0,201	0,134	0,818	0,444	0,594	-0,314	0,789	0,749	0,776	0,245	-0,177	0,829	1	
AE	-0,057	-0,030	-0,331	0,088	-0,090	-0,315	0,157	0,595	-0,120	-0,055	-0,336	0,165	0,983	-0,391	-0,130	1

Les valeurs dans le tableau sont des coefficients de corrélation de Pearson ; celles en gras mettent en relief les corrélations significatives entre les variables. Les corrélations sont faites avec n = 6 observations (3 répétitions sous jachère et 3 sous culture attelée)

ANNEXE 8. Corrélations entre les variables chimiques des sols ferrugineux (lixisols) du site de Dohoun

Variables	C total	N total	P total	P ass	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SBE	C.E.C	V (%)	Al ³⁺	H ⁺	pH eau	pH KCl	AE
C total	1															
N total	0,980	1														
P total	0,472	0,471	1													
P ass	0,434	0,441	0,522	1												
Ca ²⁺	0,847	0,860	0,539	0,649	1											
Mg ²⁺	0,808	0,836	0,355	0,318	0,878	1										
K ⁺	0,638	0,693	0,461	0,291	0,696	0,771	1									
Na ⁺	0,419	0,485	0,452	0,051	0,442	0,507	0,751	1								
SBE	0,856	0,874	0,523	0,598	0,995	0,917	0,746	0,484	1							
C.E.C	0,846	0,848	0,538	0,673	0,977	0,888	0,715	0,438	0,979	1						
V (%)	0,653	0,711	0,252	0,195	0,764	0,757	0,588	0,498	0,777	0,641	1					
Al ³⁺	0,037	0,013	0,143	0,047	-0,076	-0,161	-0,352	-0,071	-0,106	-0,050	-0,163	1				
H ⁺	-0,442	-0,426	-0,087	-0,298	-0,509	-0,429	-0,292	-0,206	-0,501	-0,464	-0,603	0,102	1			
pH eau	0,471	0,472	-0,113	0,367	0,674	0,549	0,207	0,073	0,649	0,592	0,726	-0,044	-0,611	1		
pH KCl	0,744	0,729	0,226	0,586	0,829	0,720	0,464	0,293	0,818	0,817	0,700	-0,009	-0,700	0,830	1	
AE	-0,437	-0,422	-0,079	-0,294	-0,510	-0,435	-0,309	-0,208	-0,503	-0,463	-0,607	0,154	0,999	-0,609	-0,696	1

Les valeurs dans le tableau sont des coefficients de corrélation de Pearson ; celles en gras mettent en relief les corrélations significatives entre les variables.

Les corrélations sont faites avec n = 9 observations (3 sous jachère, 3 sous culture attelée et 3 sous culture motorisée)

ANNEXE 9. Corrélations entre les variables chimiques des sols ferrallitiques (ferralsols) du site de Balla

Variables	C total	N total	P total	P ass	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SBE	C.E.C	V (%)	Al ³⁺	H ⁺	pH eau	pH KCl	AE
C total	1															
N total	0,954	1														
P total	0,198	0,171	1													
P ass	-0,028	-0,010	0,733	1												
Ca ²⁺	0,574	0,597	0,566	0,377	1											
Mg ²⁺	0,697	0,663	0,233	0,009	0,465	1										
K ⁺	0,021	-0,049	0,076	-0,003	0,131	-0,588	1									
Na ⁺	0,214	0,256	0,205	0,103	-0,262	0,192	-0,130	1								
SBE	0,725	0,717	0,540	0,289	0,964	0,658	0,033	-0,126	1							
C.E.C	0,822	0,792	0,138	-0,063	0,719	0,678	0,085	-0,115	0,832	1						
V (%)	-0,462	-0,426	0,355	0,447	-0,050	-0,334	-0,147	0,003	-0,200	-0,698	1					
Al ³⁺	0,382	0,334	0,511	0,231	-0,017	0,556	-0,374	0,745	0,160	0,118	-0,052	1				
H ⁺	0,520	0,524	0,391	-0,003	0,274	0,877	-0,612	0,452	0,464	0,415	-0,173	0,778	1			
pH eau	-0,512	-0,520	-0,384	-0,075	-0,390	-0,913	0,656	-0,218	-0,555	-0,489	0,171	-0,606	-0,949	1		
pH KCl	-0,269	-0,254	-0,353	-0,026	-0,209	-0,807	0,740	-0,168	-0,359	-0,248	0,005	-0,586	-0,908	0,951	1	
AE	0,518	0,519	0,403	0,012	0,260	0,869	-0,606	0,475	0,452	0,402	-0,168	0,801	0,999	-0,940	-0,900	1

Les valeurs dans le tableau sont des coefficients de corrélation de Pearson ; celles en gras mettent en relief les corrélations significatives entre les variables. Les corrélations sont faites avec n = 9 observations (3 sous jachère, 3 sous culture attelée et 3 sous culture motorisée)

Liste des publications tirées de la thèse

- 1. Koulibaly B.,** Traore O., Zombré P.N. et Dakuo D., 2007. Effet des amendements sur l'enracinement et la production du cotonnier sur un sol ferrugineux tropical de l'Ouest du Burkina Faso. *Science et technique*. Vol. 29, n° 1 et 2, Sciences naturelles et agronomie, p 131-142.
- 2. Koulibaly B.,** Traoré O., Dakuo D. et Zombré P.N., 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. Agron. Soc. Environ.* 13(1), 103-111.
- 3. Koulibaly B.,** Traoré O., Dakuo D. et Zombré P.N., 2009. Etude de l'effet des apports d'amendements sur les propriétés d'un sol ferrugineux tropical en culture continue dans l'ouest du Burkina Faso. *Etudes et recherches sahéliennes* n° 14 et 15, p.162-173.
- 4. Koulibaly B.,** Traoré O., Dakuo D., Zombré P.N., Bondé D., 2010. Effets de la gestion des résidus de récolte sur les rendements et les bilans culturaux d'une rotation cotonnier-maïs-sorgho au Burkina Faso. *Tropicultura*, 28(3) : 184-189.
- 5. Koulibaly B.,** Traoré O., Dakuo D., Zombré P.N., 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.*, Vol 4, 6, p 2120-2132.