

BURKINA FASO

Unité - Progrès - Justice

**MINISTRE DES ENSEIGNEMENTS SECONDAIRE,
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE POLYTECHNIQUE DE BOBO-DIOULASSO

INSTITUT DU DEVELOPPEMENT RURAL



MEMOIRE

Présenté par **SOMA Dohan Mariam**

en vue de l'obtention du

Diplôme d'Etudes Approfondies

en Gestion Intégrée des Ressources Naturelles, Option Production

Végétale, Spécialité: Sciences du Sol

THEME

**Effet des apports répétés de diverses sources
d'amendements organiques dans un sol ferrugineux
tropical lessivé (Saria, Burkina Faso) sur la
biodisponibilité du phosphore et la production du sorgho**

devant le jury composé de :

Président : Prof. SEDOGO P. Michel, Directeur de recherches, INERA

Membres : Prof. NACRO H. Bismarck, Maître de conférence, UPB

Dr. GNANKAMBARY Zacharia, Chargé de recherches, INERA

Dédicace

A mes parents qui m'ont toujours soutenue et encouragée à aller de l'avant dans les études scolaires,

A tous ceux qui oeuvrent pour la scolarisation massive des filles,

Je vous dédie ce présent mémoire.

Sommaire

Dédicace	i
Sommaire	ii
Remerciements	v
Sigles et Abréviations.....	vi
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	viii
Résumé	ix
Abstract	x
Introduction	1
Chapitre I : L'activité biologique, le phosphore et sa disponibilité dans les sols	3
I.1 L'activité biologique du sol	3
I.1.1 Définition et rôle de l'activité biologique du sol	3
I.1.2 Phénomènes influençant l'activité biologique du sol	3
I.1.2.1 Les caractéristiques physiques et chimiques du sol	3
I.1.2.2 Les modes de gestion des sols	5
I.2 Le phosphore et sa disponibilité dans les sols	6
I.2.1 Le rôle du phosphore	6
I.2.2 Forme de phosphore dans le sol et mécanismes de prélèvement par la plante	6
I.2.3 La disponibilité en phosphore des sols	9
I.2.3.1 Définition	9
I.2.3.2 Facteurs influençant la disponibilité du phosphore des sols.....	9
I.2.4 Le phosphore dans les sols du Burkina Faso	11
Chapitre II : Matériel et méthodes.....	13
2.1 Site de l'étude	13
2.2 Matériel d'étude	15
2.2.1 Matériel Végétal.....	15
2.2.2 Fertilisants	16
2.3 Méthodes	17
2.3.1 Essai au champ	17
2.3.1.1 Dispositif expérimental	17
2.3.1.2 Les opérations culturales	18

2.3.1.3 Echantillonnage des sols	18
2.3.1.4 Paramètres mesurés	19
2.3.2 Analyses de sols	19
2.3.2.1 Détermination du pH du sol	19
2.3.2.2 Dosage du carbone et de la matière organique du sol	19
2.3.2.3 Extraction et dosage du phosphore Bray I	20
2.3.2.4 Détermination de la biomasse microbienne	20
2.3.2.5 Extraction et dosage du phosphore résine et du phosphore microbien	21
2.3.3 Méthodes d'analyses statistiques	22
Chapitre III Résultats et Discussion	23
3.1 Effet des amendements organiques sur le pH et la teneur en matière organique du sol	23
3.1.1 Résultats	23
3.1.2 Discussion	24
3.1.3 Conclusion.....	25
3.2 Effet des amendements organiques sur le phosphore disponible du sol	25
3.2.1 Résultats	25
3.2.1.1 Effet sur le phosphore disponible Bray I.....	25
3.2.1.2 Evolution du phosphore résine au cours de la culture.....	26
3.2.1.3 Relation entre le pH, la teneur en matière organique et la disponibilité en phosphore des sols.....	27
3.2.2 Discussion	28
3.2.3 Conclusion.....	29
3.3 Effet (à long terme) des amendements organiques sur la biomasse microbienne et le phosphore microbien du sol	30
3.3.1 Résultats	30
3.3.2 Discussion	32
3.3.3 Conclusion.....	33
3.4 Effet des amendements organiques sur la croissance et le rendement du sorgho	33
3.4.1 Résultats	33
3.4.2 Discussion	35
3.4.3 Conclusion.....	36
3.5 Relations entre les différents paramètres chimiques, biologiques et les rendements agricoles	36
3.5.1 Résultats	36

3.5.2 Discussion	37
3.5.3 Conclusion.....	38
Conclusion générale	39
Perspectives.....	40
Références bibliographiques	41
Annexes.....	A

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a bénéficié du soutien de plusieurs personnes qui n'ont ménagé aucun effort à son aboutissement.

Ainsi, nous remercions tous les responsables administratifs de l'INERA pour nous avoir acceptée comme stagiaire au sein de cette structure.

Nous remercions la direction de l'IDR et tous les enseignants qui lui sont affiliés pour notre formation.

Nous pensons particulièrement au Professeur Sedogo P. Michel, responsable scientifique du DEA science du sol de l'université de Bobo Dioulasso pour avoir accepté de diriger notre mémoire. Nous lui disons également merci pour nous avoir initié à la recherche agronomique et nous avoir enseigné l'esprit d'équipe.

Merci au Professeur Nacro H. Bismarck notre Codirecteur de mémoire pour notre encadrement et pour tous les suggestions apportées pour l'amélioration de la qualité de ce document.

Nous remercions les responsables du projet RFPP qui nous ont permis d'effectuer certaines analyses de laboratoire. Nous disons merci à Kiba Innocent, pour son apport inestimable.

Nos remerciements vont à l'endroit du Dr Gnankambary Zacharia pour tous ses encouragements et conseils.

Nous disons merci à tout le personnel du laboratoire Sol Eau Plante des stations de l'INERA/ Saria et Kamboinsé. Nous pensons à M. Sanou Martin, M. Coulibaly Dofinita, M. Ramde Martin, M. Ouandaogo Noufou, M. Moyenga Momouni, M. Kaboré Jean Paul, M. Ouédraogo Alain, M. Sakandé Ali, Mme Poda Leocadie.

Merci à tous mes camarades stagiaires Pouya Mathias, Sama Oussen, Sanon Bachirou, Ouédraogo Sibiri, Sœur Somda Béatrice, Magnini Eric, Naré Alice.

A mon père Soma K Seydou, à ma mère Rokia, à mes frères et sœurs Maïmouna, Madeleine, Ali, nous leur disons également merci pour la bonne ambiance familiale.

Sigles et Abréviations

- AFNOR** : Association Française de Normalisation
- BM** : Biomasse microbienne
- C. Aér** : Compost Aérobie
- C. Anaér** : Compost Anaérobie
- DEA** : Diplôme d'Etudes Approfondies
- IDR** : Institut du Développement Rural
- INERA** : Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles
- JAS** : Jours après semis
- MO** : Matière organique
- Rdmt** : Rendements
- RFPP** : Research Fellow Partnership Programme

Liste des figures

Figure I: Cycle du phosphore (Source : Sylvia <i>et al.</i> , 2005)	8
Figure II: Zones agro-climatiques du Burkina Faso (Source : Zougmoré, 2003).....	13
Figure III : Pluviosités des années 2000 à 2009 de Saria	14
Figure IV : Pluviosité mensuelle de la campagne 2009 de Saria.....	15
Figure V : Schéma de prélèvement du sol sur la parcelle.....	18
Figure VI : Teneurs en Phosphore Bray I des sols prélevés en fin de campagne	26
Figure VII : Evolution du phosphore résine au cours de la saison culturale	27
Figure VIII : Biomasse microbienne des sols prélevés en fin de campagne	30
Figure IX : Evolution du phosphore microbien des sols	31
Figure X : Analyse en composante principale entre les propriétés chimiques, biologiques du sol et les rendements du sorgho	37

Liste des tableaux

Tableau I : Caractéristiques chimiques des différents amendements organiques	16
Tableau II : Traitements et doses d'éléments nutritifs apportés.....	17
Tableau III Teneurs en matière organique et le pH des sols prélevés en fin de campagne.....	23
Tableau IV : Coefficients de corrélation de Pearson entre les propriétés chimiques et la disponibilité en phosphore du sol (P = 5 %)	27
Tableau V : Effet des différents amendements organiques sur la croissance et le rendement du sorgho	34
Tableau VI : Rendements grains en Kg/ Ha sur huit dernières campagnes	35

Résumé

La faible disponibilité en phosphore des sols d'Afrique Subsaharienne est une contrainte à la gestion durable des terres agricoles car limitant les rendements agricoles. Maintenir une bonne activité biologique du sol est une alternative à l'amélioration de la disponibilité en éléments nutritifs des sols.

L'objectif de cette étude a été d'évaluer l'effet à long terme de quatre types d'amendements organiques sur l'activité biologique et la disponibilité du phosphore d'un sol ferrugineux tropical. L'étude a été conduite sur un essai implanté depuis 29 ans à la station expérimentale de l'INERA/Saria au Burkina Faso (Latitude 12° 16 Nord, Longitude 2° 9 Est, Altitude 300m). Les amendements organiques étudiés sont la paille de sorgho, le fumier de bovin, les composts aérobies et anaérobies.

Nous avons observé que les différentes sources d'amendements organiques augmentent le pH et la teneur en matière organique du sol, éléments importants pour l'activité biologique et la disponibilité des éléments nutritifs. Le fumier et les composts à l'exception de la paille améliorent de façon significative la biomasse microbienne du sol de 59 à 94 %. Ils améliorent la disponibilité en phosphore des sols de 19 à 27 % pour le phosphore Bray I du sol. L'analyse de l'évolution de la teneur en phosphore résine montre une meilleure performance du fumier et des composts. L'apport de paille n'a pas amélioré significativement le phosphore disponible du sol. On note un taux en phosphore microbien significativement plus élevé au niveau des sols traités avec les amendements organiques par rapport au sol ne recevant que de la fumure minérale. Les teneurs en phosphore disponible du sol sont corrélées positivement au pH et à la teneur en matière organique du sol.

Sur le plan agricole, les composts et le fumier améliorent de façon significative les rendements grains et pailles. L'apport de paille, bien qu'ayant amélioré la croissance et les rendements paille, n'a pas amélioré significativement les rendements grains.

L'apport des amendements organiques est un facteur de sécurité pour la production agricole car pouvant améliorer la disponibilité en phosphore des sols et l'activité biologique des sols. Toutefois, ces amendements organiques doivent être de bonne qualité, c'est-à-dire bien décomposés tels que le fumier et les composts.

Mots clés : amendements organiques, activité biologique, phosphore disponible, sol ferrugineux tropical, Sorgho, Burkina Faso

Abstract

Low phosphorus availability in sub-Saharan Africa soils is a constraint to sustainable management of farmland. Maintaining good soil biological activity is an alternative to improve soil nutrients availability.

This study aims to assess the long-term effect of four organics substrates on soil biological activity and phosphorus availability in a ferruginous tropical soil. The study was conducted on a long term cultivated field (29 years) at the experimental station of INERA / Saria in Burkina Faso (Latitude 12 ° 16 North, Longitude 2 ° 9 East, altitude 300m). The substrates studied are sorghum straw, cattle manure, aerobic compost and anaerobic compost. As results, we note that different substrates improve pH and soil organic matter content that are important for biological activity and nutrient availability. The manure and composts except sorghum straw, improve significantly the soil microbial biomass from 59 to 94%. Improvement of soil available phosphorus (Bray I) was from 19 to 27%. The analysis of the evolution of the resin extractable phosphorus shows better performance of manure and composts. The addition of straw did not improve significantly the soil available phosphorus. There is a microbial phosphorus levels significantly higher in soils treated with organic amendments compared to soil receiving mineral fertilizer only. The levels of available phosphorus in soil are positively correlated to pH and organic matter content of soil. Composts and manure significantly increase grain yields and straw. The addition of straw, although improved growth and straw yields did not improve significantly grain yields. Use of organics amendments is an important factor for agricultural production security because that can improve phosphorus availability and soil biological activity. However, these organics amendments should be good qualities, well decomposed as manure and compost.

Keywords: organics amendments, soil biological activity, available phosphorus, ferruginous tropical soil, Sorghum, Burkina Faso

Introduction

La disponibilité limitée en éléments nutritifs des sols est l'une des principales causes des faibles rendements agricoles en Afrique subsaharienne. L'un des éléments nutritifs le plus limitant de la production agricole est le phosphore (Sedogo, 1981 ; Pieri, 1991 ; Compaoré *et al.*, 2001 ; Lompo, 2009). La concentration des ions phosphates dans la solution des sols est faible et ne permet pas une nutrition phosphatée adéquate des cultures (Compaoré *et al.*, 2001). Le phosphore est un élément capital pour le règne végétal. Il joue un rôle important sur la croissance, la fécondation et la mise à fruit (Mémento de l'agronome, 1991). Une pratique agricole est considérée comme non durable à chaque fois que la biodisponibilité du phosphore limite les rendements indispensables à la satisfaction des besoins alimentaires (Pieri, 1991). Pour accroître de façon durable la production agricole, il s'avère nécessaire non seulement d'accroître les teneurs en phosphore des sols mais aussi d'améliorer leur biodisponibilité dans les sols.

Une des composantes essentielles de la fertilité des sols est celle biologique. Les organismes du sol, par leurs activités, interviennent dans le maintien des équilibres pédologiques et plus particulièrement le maintien de leurs caractéristiques physico chimiques (Bachelier, 1973). Ils interviennent en agissant d'une part sur le stock d'éléments minéraux assimilables obtenus par minéralisation de la matière organique et d'autre part sur la structure du sol (Zombré, 2006). En ce qui concerne le phosphore et l'activité biologique, des études ont souligné que le phosphore microbien dans le sol constitue une source labile pour les plantes car devenant facilement disponible à travers le processus de minéralisation (Damodar *et al.*, 2005 ; Oberson et Joner., 2005). Aussi, l'immobilisation du phosphore dans les cellules des microorganismes prévient leurs fortes adsorptions sur les constituants du sol (Oberson *et al.*, 2006). Accroître l'activité biologique des sols est donc l'une des alternatives pour accroître la disponibilité en phosphore, donc la fertilité des sols.

Plusieurs études ont souligné le rôle de la matière organique dans l'amélioration de la biologie du sol et l'accroissement des rendements. Zombré (2006), a noté une amélioration de l'activité biologique d'un sol ferrugineux tropical et un sol brun eutrophe suite à l'apport de paille de *Loudetia togoensis* et de compost. Li *et al.* (2008) ont observé des valeurs de biomasses microbiennes plus élevées au niveau des sols ayant reçu en plus de la fertilisation minérale du fumier de porc (451 mg/kg), de la paille de maïs (282 mg/kg) et des valeurs faibles au niveau des sols non traités (96 mg/kg) et des sols ne recevant que la fumure

minérale (214 mg/kg). Ces auteurs notent une corrélation significativement positive entre la teneur en matière organique du sol et le carbone de la biomasse microbienne ($r = 0,9078$, $P < 0,01$). La fumure organique est nécessaire pour maintenir la production agricole à un niveau acceptable (Pieri, 1989 ; Sedogo, 1993).

L'effet des amendements organiques, sur l'activité biologique du sol et les rendements des cultures est largement discuté. Toutefois très peu d'études ont lié la biologie du sol à disponibilité du phosphore en Afrique subsaharienne et particulièrement au Burkina Faso.

Ainsi, l'objectif de notre étude est d'évaluer les effets de 29 ans d'apport de quatre types d'amendements organiques sur l'activité biologique et la disponibilité en phosphore d'un sol ferrugineux tropical lessivé.

Nous sommes partis des hypothèses suivantes :

- 1) L'application des substrats organiques tels que le fumier, les composts aérobie et anaérobie, la paille de sorgho augmentent la biomasse microbienne et le phosphore microbien du sol et cette amélioration est fonction des caractéristiques chimiques des substrats et de leurs aptitudes à améliorer les teneurs en carbone du sol.
- 2) Le phosphore disponible des sols et le phosphore microbien au cours de la saison vont varier en fonction du type de substrat organique apporté.

Ce mémoire, qui présente les résultats obtenus, s'articule autour de trois chapitres. Dans un premier chapitre, nous faisons une synthèse sur l'activité biologique et la disponibilité en phosphore dans les sols. Le second chapitre présente les matériels et les méthodes utilisées pour vérifier nos hypothèses. Le troisième chapitre présente les résultats obtenus et les discussions y afférentes ; il est suivi par la conclusion.

Chapitre I : L'activité biologique, le phosphore et sa disponibilité dans les sols

I. 1 L'activité biologique du sol

I.1.1 Définition et rôle de l'activité biologique du sol

L'activité biologique d'un sol, correspond au métabolisme de tout ce qui y vit, c'est-à-dire à l'ensemble des processus complexes de transformation de matière et d'énergie au cours des phénomènes d'anabolisme et de catabolisme au sein de sa population (Bachelier, 1973).

Les organismes du sol comprennent la faune du sol (nématodes, annélides, arthropodes) et la microflore (Champignons, bactéries, actinomycètes, algues).

Les organismes du sol jouent un rôle important dans le maintien des équilibres pédologiques (Bachelier, 1973 ; Mémento de l'agronome, 2002). Selon leurs natures et leurs actions, ces êtres vivants ont une influence plus ou moins marquée sur la morphologie des sols, leurs qualités physiques, leurs caractéristiques chimiques, leurs dynamiques et leurs fertilités (Bachelier, 1973). La faune du sol contribue grandement à la fragmentation des débris végétaux. Elle peut modifier considérablement la porosité, la structure, la rétention et les éléments chimiques par leur activité de fouissage ou de cimentation ou de transports d'éléments (Bachelier, 1973). La microflore, accroît le potentiel enzymatique des sols et assure plus ou moins les cycles biologiques de nombreux éléments minéraux : azote, carbone, soufre, phosphore fer, manganèse. Elle conditionne la synthèse et la dégradation des substances humiques. Les organismes du sol interviennent en agissant sur le stock d'éléments minéraux assimilables, obtenus par minéralisation de la matière organique (Kaur *et al.*, 2005 ; Zombré, 2006).

I.1.2 Facteurs influençant l'activité biologique du sol

I.1.2.1 Les caractéristiques physiques et chimiques du sol

L'activité biologique, bien qu'à l'origine des équilibres pédologiques dépend fortement des propriétés physiques et chimiques des sols.

•

- L'humidité du sol

L'humidité du sol conditionne l'activité des microorganismes telluriques. En effet, Fardoux *et al.* (2000) ont enregistré en laboratoire des biomasses microbiennes plus faibles obtenues avec des sols humidifiés à 5 % de la capacité au champ comparativement à des sols humidifiés à 100 % de la capacité au champ. Mabuhay *et al.* (2004) ont noté pendant des études sur des sites érodés et non érodés une corrélation positive entre l'humidité du sol et la biomasse microbienne ($r^2=0,920$).

- L'acidité du sol

L'acidité du sol détermine l'abondance, les formes, et l'activité des microorganismes du sol. En effet, il a été montré que les champignons sont prépondérants dans les sols acides tandis que les bactéries prédominent dans les sols neutres ou légèrement alcalins (Davet, 1996). Des expérimentations ont permis de constater que la synthèse de certains métabolites n'avait lieu que dans des limites de pH très étroites à l'intérieur du domaine de croissance. On a l'exemple d'*Aspergillus parasiticus* dont la croissance est indifférente à des pH compris entre 3,3 et 7,1 ; mais il ne produit de l'aflatoxine qu'à des pH inférieurs à 5,5 (Davet, 1996).

- La teneur en matière organique et en éléments nutritifs des sols

La matière organique est la principale source d'énergie pour les microorganismes telluriques (Chaussod, 1996). Li *et al.* (2004) ont noté dans des sols forestiers une relation positive entre la biomasse microbienne du sol et la teneur en carbone du sol ($r = 0,46$; $P < 0,02$). Les travaux de Li *et al.* (2008) en chine, ont montré également des corrélations positives entre la biomasse microbienne du sol et les propriétés chimiques du sol. Ces auteurs observent des coefficients de corrélations de 0,91 entre la matière organique du sol et le carbone de la biomasse microbienne. Les coefficients de corrélation sont respectivement de 0,94 et de 0,85 entre la biomasse microbienne du sol et la teneur en azote du sol et entre la biomasse microbienne et la teneur en phosphore du sol.

- La granulométrie du sol

La proportion des différentes fractions granulométrique du sol détermine l'activité biologique du sol. Les études de Pallo *et al.* (2008) dans la zone sud soudanienne du Burkina Faso, notent des coefficients de corrélation négatifs entre le carbone de la biomasse microbienne et le pourcentage d'argile. Ces auteurs notent également des coefficients de corrélation positifs entre le carbone de la biomasse microbienne et le rapport sable/argile. Feller *et al.* (1983)

notent dans un sol sableux une biodégradabilité plus élevée de la matière organique associée aux fractions grossières du sol se traduisant par un taux de minéralisation plus élevé du carbone. Les fractions inférieures à 50 μm ont une biodégradabilité plus faible. Ouattara (2009) n'a pas trouvé de différences significatives entre la biomasse microbienne en sols argileux et celle en sols sableux de Bondoukui au Burkina.

1.1.2.2 Les modes de gestion des sols

Les hommes à travers leurs activités et leurs modes de gestion des sols modifient intensément l'activité biologique des sols.

Les modes de gestion du sol tels que le travail du sol peuvent modifier l'activité biologique du sol. Les travaux de Saffigna *et al.* (1989) ont souligné des biomasses microbiennes de 14 à 21 fois plus élevées dans un système sans labour que dans un système avec labour. Maurer-Troxler *et al.* (2006), ont relevé dans un système de travail intense du sol (labour) 94 g/m^2 de lombrics contre 190 g/m^2 dans un système de semis direct sans labour.

La mise à feu influence aussi la biologie du sol. Les études de Waldrop et Harden (2008) montrent que la mise à feu réduisait la biomasse microbienne et influençait sa composition dans les horizons organiques du sol.

L'apport de fertilisants organique et minéral modifie la biomasse microbienne et l'activité biologique du sol. Il ressort des travaux de Zombré (2006), au Burkina Faso que l'activité biologique est nettement améliorée par l'apport de compost et de paille de *Loudetia togoensis* en sol ferrugineux tropicaux lessivé et en sols brunifiés. Kaur *et al.* (2005) note en Inde que l'application de fumier, de fiente de volaille seule ou combinée à la fertilisation chimique, améliorait l'activité de flore microbienne et la biomasse microbienne du sol. Ils notent des valeurs de biomasse microbienne de 150 à 177 mg/kg avec la fertilisation minérale seule contre des valeurs de 302 à 397 mg/kg dans les sols recevant le fumier de ferme, les résidus de canne à sucre et de 541 mg/kg dans les sols recevant les fiente de volaille. Li *et al.* (2008) en Chine, ont aussi observé des valeurs de biomasse microbienne plus élevées au niveau des sols ayant reçu en plus de la fertilisation minérale du fumier de porc (451 mg/kg), de la paille de maïs (281 mg/kg) et des valeurs faibles au niveau des sols non traités (96 mg/kg) et des sols ne recevant que la fumure minérale (214 mg/kg). Mabuhay *et al.* (2006) notent également des valeurs de biomasse microbienne 3,2 et 2,9 fois plus élevées respectivement avec la fiente de volaille (856 mg/kg de sol) et la fumure minérale (770 mg/kg) comparativement au sol non amendé (298 mg/kg).

Les apports organiques améliorent la biologie du sol, toutefois, cela va dépendre de la qualité des substrats. Li *et al.* (2008) notent que le rapport C/N des substrats pouvait influencer la composition de la communauté microbienne. Ils notent des valeurs de biomasse microbienne plus faible avec l'apport de paille de maïs et de blé comparativement au fumier.

1.2 Le phosphore et sa disponibilité dans les sols

1.21 Le rôle du phosphore

Le phosphore est classé avec l'azote et le potassium comme un constituant fondamental à la vie des plantes et des animaux. Il représente un élément capital pour la croissance et le développement de la plante. Il favorise le développement racinaire et a un rôle essentiel dans la fécondation et la mise en fruit et la qualité des grains (Mémento de l'agronome, 1991 ; Lompo, 2009). Au Niger, Buerkert *et al.* (1998) notent avec l'application du phosphore à un sol acide une augmentation de la concentration en acide phytique dans les grains de 25 à 29 %. Le phosphore joue également un rôle de transfert d'énergie pendant la biosynthèse et la dégradation des molécules (Mémento de l'agronome, 1991 ; Marschner, 1995). Il intervient aussi dans la structuration des macromolécules telles que les acides nucléiques (acide désoxyribonucléique, acide nucléique) et les phospholipides qui contrôlent la stabilité et les propriétés des membranes cellulaires (Marschner, 1995). Une déficience en phosphore, entraîne un retard de croissance se traduisant par la réduction de la croissance des cellules et des feuilles, de la respiration et de la photosynthèse.

L'effet du phosphore sur les rendements des plantes annuelles est très important si les autres facteurs clés de la production sont favorables (Mémento de l'agronome, 2002). Des travaux de recherches menés par Buerkert *et al.* (2001) en Afrique Sub-Saharienne sur la fertilisation phosphatée incluant les phosphates naturels des roches et les phosphates solubles notent une amélioration de 28 à 72 % de la production de l'arachide.

1.2.2 Forme de phosphore dans le sol et mécanismes de prélèvement par la plante

Le cycle du phosphore dans le sol inclut des formes organiques et minérales (Schvartz *et al.*, 2005 ; Sylvia *et al.*, 2005).

Les formes minérales sont représentées par :

- les phosphates calciques (apatite, phosphate bi et tri calcique)
- les phosphates de fer et d'aluminium

- les ions phosphates HPO_4^{2-} et H_2PO_4^- représentant les deux formes de phosphates présentent dans la solution du sol.

Les formes minérales de phosphore représentent selon Lompo (2009), environ 83 % du phosphore total des sols ferrugineux tropicaux cultivés du Burkina.

La part de phosphore inclus dans la fraction organique du sol varie dans les proportions importantes selon les systèmes de culture. Elle représente 25 à 30 % du phosphore total dans les sols mis en culture depuis longtemps et varie jusqu'à des teneurs beaucoup plus élevées (70 à 80 %) sous prairie permanente et dans les sols forestiers (Schvartz *et al.*, 2005). Sur des sols ferrugineux tropicaux cultivés du Burkina, Lompo (2009) a montré que le phosphore organique représentait 17 % du phosphore total. Les formes de phosphore organique dans le sol sont représentées par :

- l'inositol hexa phosphate communément appelé acide phytique. Il représente selon Sylvia *et al.* (2005), 10 à 50 % du phosphore organique total du sol.
- Les phospholipides et les nucléotides qui représente 1 à 5 % du phosphore organique total du sol.
- Le phosphore de la biomasse microbienne, qui est la forme active du phosphore organique dans le sol.

Ces différentes formes de phosphore que présente le cycle du phosphore dans le sol sont affectées par les réactions chimiques et biologiques du sol (Figure I).

Le pool des ions orthophosphates de la solution du sol sont alimenté par les ions phosphates provenant de la minéralisation de la matière organique du sol et de la solubilisation de l'apatite. Les ions orthophosphates de la solution du sol peuvent être pris par la plante ou immobilisés par les microorganismes du sol. Ils peuvent également être fixé par la matière organique du sol et par des cations tels que le calcium, le fer, et l'aluminium. Les phosphates liés au calcium peuvent évoluer vers des formes minérales très peu solubles tel que l'apatite.

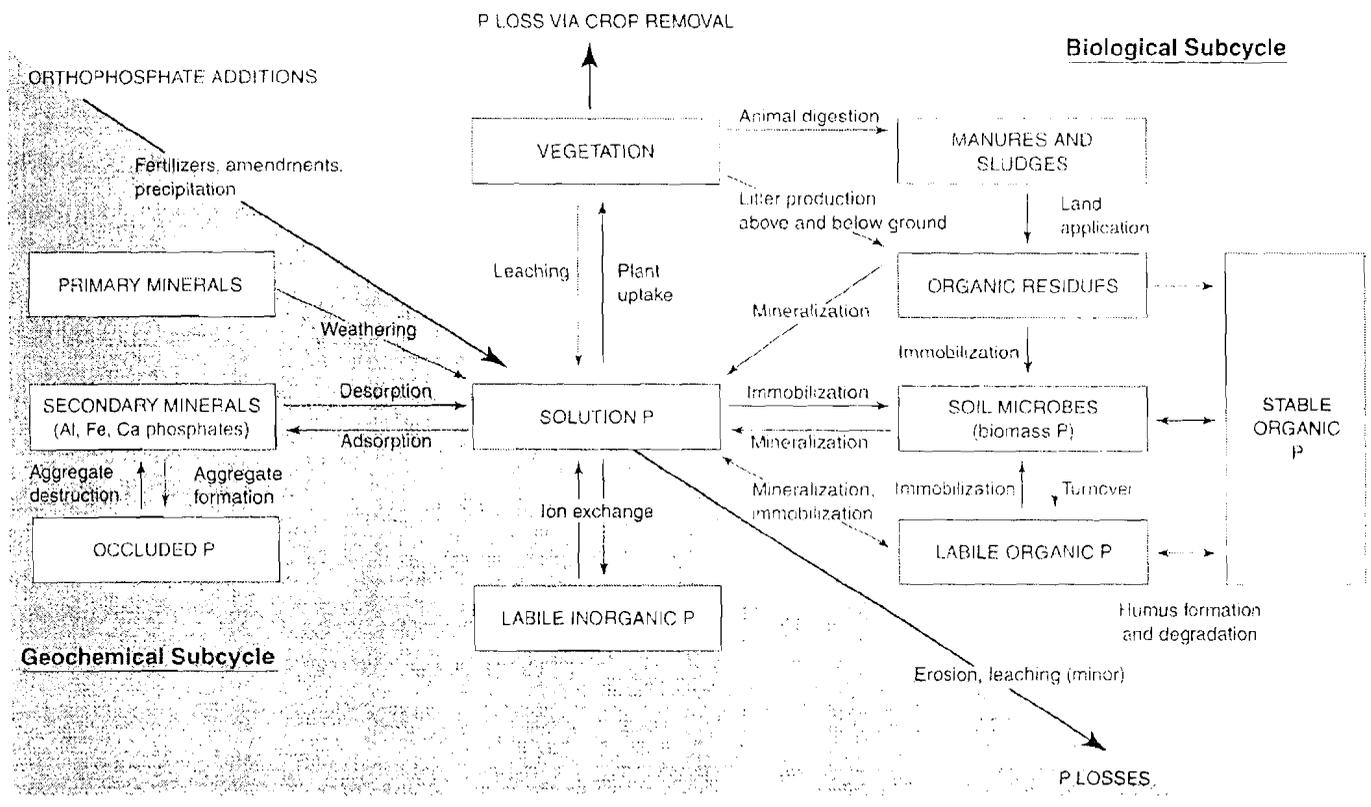


Figure 1: Cycle du phosphore (Source : Sylvia *et al.*, 2005)

La plante prélève le phosphore dans le sol sous la forme d'ions orthophosphates. L'intensité du prélèvement dépend de l'espèce végétale et du stade de développement de la plante. En effet, le prélèvement du phosphore faible pendant les premiers stades de développement de la culture devient très élevé pendant la période de croissance rapide de la plante. Dans les premiers stades de développement, la plante utilise les réserves phosphatées présentes dans la graine (Frossard *et al.*, 2004). Le prélèvement de phosphore par la plante se fait contre un gradient de concentration et un gradient électrochimique. En effet, sa concentration dans les cellules de la racine est plus élevée que dans la solution du sol. Aussi les membranes cellulaires et cytoplasmiques de la plante sont aussi chargées négativement que les ions phosphates de la solution du sol (Frossard *et al.*, 2004). Ainsi, le prélèvement du phosphore se fait par l'intermédiaire de protéines de type H^+ -ATPase. Toutefois, pour que la plante puisse prélever le phosphore dans le sol, il faut qu'il soit disponible dans la solution du sol.

I.2.3 La disponibilité en phosphore des sols

I.2.3.1 Définition

La disponibilité du phosphore des cultures est définie comme la quantité totale de phosphore dans le sol susceptible d'aboutir dans la solution du sol sous forme d'ions orthophosphates pendant une période équivalente à la durée de croissance de la culture (Frossard *et al.*, 2004).

Elle est caractérisée par trois facteurs que sont l'intensité, la quantité, et la capacité (Frossard *et al.*, 2004 ; Lompo, 2009) :

- Le facteur intensité représente la quantité des ions phosphates dans la solution du sol. Il est exprimé en mg/l.
- Le facteur quantité représente la quantité totale de phosphore susceptible de passer de la phase solide du sol à la solution du sol, et de devenir disponible aux plantes. On l'exprime en mg de P/ kg de sol.
- Le facteur capacité représente l'aptitude d'un sol à maintenir le facteur intensité constant quand la quantité varie soit lors d'un apport d'engrais ou lors d'un prélèvement par les plantes. Il est encore appelé pouvoir tampon du sol et s'exprime en litre/kg de sol.

I.2.3.2 Facteurs influençant la disponibilité du phosphore des sols

Plusieurs phénomènes influencent la disponibilité du phosphore des sols :

- La teneur en matière organique du sol

La matière organique du sol est comme une source et un réservoir de nutriments pour la plante (Bationo *et al.*, 1998). Elle contient la quasi-totalité de l'azote et 20 à 80 % du phosphore du sol (Bationo *et al.*, 1998). La matière organique fournit au moins 50 % du phosphore assimilable et beaucoup plus dans les sols à fort pouvoir fixateur (Mémento de l'agronome, 2002).

- La disponibilité en fer en aluminium et calcium des sols

Les oxydes de fer et d'alumine, les carbonates de calcium sont des composés susceptibles d'adsorber les anions ortho phosphate du sol. (Dubus, 1997 ; Schwartz *et al.*, 2005). Leur augmentation dans le sol se traduirait par une baisse de la disponibilité en phosphore du sol. Frossard *et al.* (1992) notent des corrélations positives entre la teneur en phosphore fixé du sol et la teneur en Fe_2O_3 du sol ($r^2 = 0,80$).

- L'acidité du sol

A pH acide, la disponibilité de certains éléments chimiques tels que l'aluminium augmente (Calvet, 2003). Ces éléments chimiques adsorbent le phosphore abaissant ainsi sa biodisponibilité (Dubus, 1997). Marschner *et al.* (2005) notent une meilleure assimilation du phosphore dans les sols neutres, et une faible assimilation dans les sols acides et les sols alcalins. Le pH optimal pour la disponibilité du phosphore se situe entre 6,5 et 7.

- La biologie du sol

Les microorganismes du sol impliqués dans le cycle du phosphore regroupent tous les éléments cellulaires de la microflore et de la microfaune du sol ayant un diamètre inférieur à 100 μm . Ils comprennent les bactéries, les champignons, les protozoaires, les algues, les oomycètes. Les virus, les prions et les viroïdes peuvent être inclus mais leur détection incertaine fait qu'ils sont rarement inclus dans les études des cycles des nutriments (Oberson et Joner, 2005).

Le rôle des microorganismes sur la disponibilité du phosphore est largement discuté. Selon Damodar *et al.* (2005), le phosphore microbien dans le sol, constitue une source labile pour les plantes car devenant facilement disponible à travers le processus de minéralisation (Damodar *et al.*, 2005 ; Oberson et Joner, 2005). Aussi, l'immobilisation du phosphore des sols prévient leur forte fixation sur certains constituants du sol comme l'aluminium et le fer (Oberson *et al.*, 2006).

Certains organismes libres ou symbiotes sont reconnus comme solubilisatrices du phosphore des sols. Wan and Wong (2004), notent au cours d'essai au laboratoire pendant 21 jours une amélioration du phosphore disponible du sol (phosphore extraite par l'eau). Ils notent une corrélation significativement positive entre l'abondance des bactéries solubilisatrices (*Bacillus megaterium*) du phosphore et la quantité de phosphore extraite par l'eau ($r = 0,547$; $p < 0,01$). Des microorganismes symbiotes tels que les mycorhizes ont également été reconnus comme essentiels à la nutrition phosphatée des plantes. Les mycorhizes sont en effet une association à bénéfices réciproques entre les racines des plantes et certains champignons. Les champignons mycorhiziens reçoivent de la plante hôte des glucides et divers métabolites nécessaires à leur croissance et à leur fructification. En contrepartie, le mycélium qui explore un grand volume du sol, transfère à la plante des éléments minéraux qui sont essentiels à son développement (Schwartz *et al.*, 2005).

- Modes de gestion des sols

Les modes de gestion des sols déterminent la disponibilité en phosphore des sols. L'agriculture minière sans apport de fertilisant conduit à une baisse de la teneur en phosphore des sols. Au Burkina Faso, sur des sols ferrugineux tropicaux, les travaux de Lompo (2008) notent sur des parcelles cultivées ne recevant pas de fertilisants, un bilan partiel en phosphore négatif (- 0,9 kg de P/ha/an). Selon Hafner *et al.* (1993), l'addition de résidus culturaux à un sol sableux acide déficient en phosphore augmente de façon significative l'assimilation du phosphore et le rendement du petit mil. Ces auteurs notent des améliorations de la teneur en phosphore disponible du sol (Bray I) de 7,4 à 8,9 mg/kg suite à l'apport de paille du mil. Les travaux de Lompo (2009) notent que l'apport de fumier à la dose de 5 t/ha tous les deux ans permettait d'accroître de 17% la teneur en phosphore Bray I des sols traités avec la fumure minérale seul.

Damodar *et al.* (2005), ont montré en Inde au cours d'essai d'incubation sur la profondeur 0-15 cm d'un alfisol que l'addition de résidus de blé et de soja seul ou avec un fertilisant phosphaté entraîne une augmentation significative du phosphore microbien par rapport au témoin sans apport et au fertilisant phosphaté seul durant toute la période d'incubation.

Kaur *et al.* (2005) notent en Inde également une augmentation du taux de d'azote, du phosphore et du potassium totaux suite à une fertilisation organique.

1.2.4 Le phosphore dans les sols du Burkina Faso

Les sols du Burkina Faso sont représentés en majeure partie par des sols ferrugineux tropicaux (39 %). Ces sols sont carencés en phosphore et la part disponible de ce phosphore reste faible (Pallo *et al.*, 1989 ; Sedogo 1993 ; Compaoré *et al.*, 2001, 2003). Ces sols selon Pallo *et al.* (1989) ont un taux en phosphore disponible situé entre 0,02 et 2,9 mg/kg de sol. Compaoré *et al.* (2003) notent une teneur moyenne en phosphore Bray I de 1,7 mg/kg dans ces sols.

Lompo (2009), a montré sur des parcelles ne recevant pas de fertilisant, que le bilan partiel en phosphore est négatif (- 0,9 kg de P/ha/an).

Gnankambary *et al.* (2008) notent que le manque de phosphore est limitant pour la respiration microbienne dans deux parcs agro forestiers dans la zone sud soudanienne du Burkina Faso.

Les études de Compaoré *et al.* (2001) sur les sols soudano sahéliens du Burkina Faso (sols ferrugineux tropicaux), ont montré que les phosphores de ces sols étaient un facteur limitant des rendements de cette zone. En effet, ils notent à travers la méthode d'échange isotopique que les concentrations moyennes en ions phosphates dans la solution du sol étaient voisines

de 0,07 mg P l⁻¹ dans ces sols. Ces concentrations ne permettent pas une nutrition phosphatée adéquate des cultures atteinte pour des valeurs supérieures à 0,2 mg P l⁻¹. Ces auteurs notent également que le phosphore biodisponible d'un sol n'est plus un facteur limitant des rendements dès que la quantité E1 > 5 mg P kg⁻¹ (ions instantanément échangeables). Dans les sols soudano sahéliens du Burkina Faso, les valeurs E1 trouvées par Compaoré *et al.* (2001) sont en moyenne de 1,12 mg P kg⁻¹, donc très inférieures à la valeur limite de nutrition adéquate des cultures.

Chapitre II : Matériel et méthodes

2.1 Site de l'étude

L'étude a été conduite à la station de recherches environnementales et agricoles de Saria / INERA.

La station de Saria est située au centre-ouest du Burkina, Latitude 12° 16 Nord, Longitude 2° 9 Est, Altitude d'environ 300m.

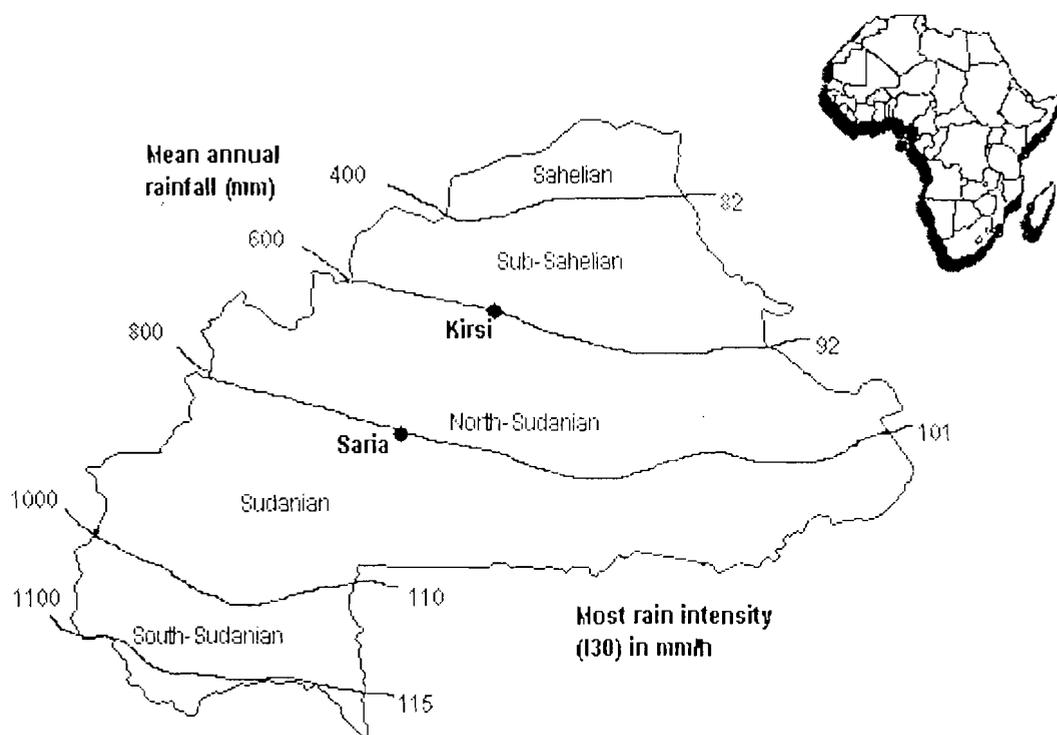


Figure II: Zones agro-climatiques du Burkina Faso (Source : Zougmoré, 2003)

Le climat de Saria est de type Nord soudanien avec une pluviosité moyenne de 800 mm (Figure II, Figure III). La campagne 2009 fait partie des campagnes les plus pluvieuses avec une pluviosité annuelle de 905 mm. Aussi on enregistre 8 mois de saison de pluie allant de mars à octobre (Figure IV). Toutefois on note une répartition irrégulière des pluies. Le mois ayant enregistré la plus grande hauteur d'eau tombée ne correspond pas au mois ayant eu le plus grand nombre de jours de pluie (Figure IV).

La température moyenne annuelle de la station est de 28°C avec des extrêmes fluctuant entre 12° C en décembre – janvier, et 40° C en mars – avril. L'évapotranspiration potentielle varie entre 1700 et 2000 mm/an. L'humidité relative de l'air, qui atteint 60 à 80 % entre juin et août, n'est plus que de 15 % en février (Lompo, 2009).

Les sols de Saria font partie des sols ferrugineux, lessivés ou non (Sedogo 1981, 1993). Ces sols représentent 39 % des sols du Burkina Faso. La caractérisation des argiles par Sedogo (1981) montre une prédominance de la kaolinite et la présence d'illite. La texture est sablo limoneuse en surface et argilo sableuse en profondeur (Sedogo, 1993). Ce sont des sols carencés en phosphore et présentant dans certaines conditions des déficiences en azote et potasse. Ils s'acidifient rapidement sous les effets de la culture continue et des apports essentiellement d'engrais chimique (Sedogo 1981, 1993).

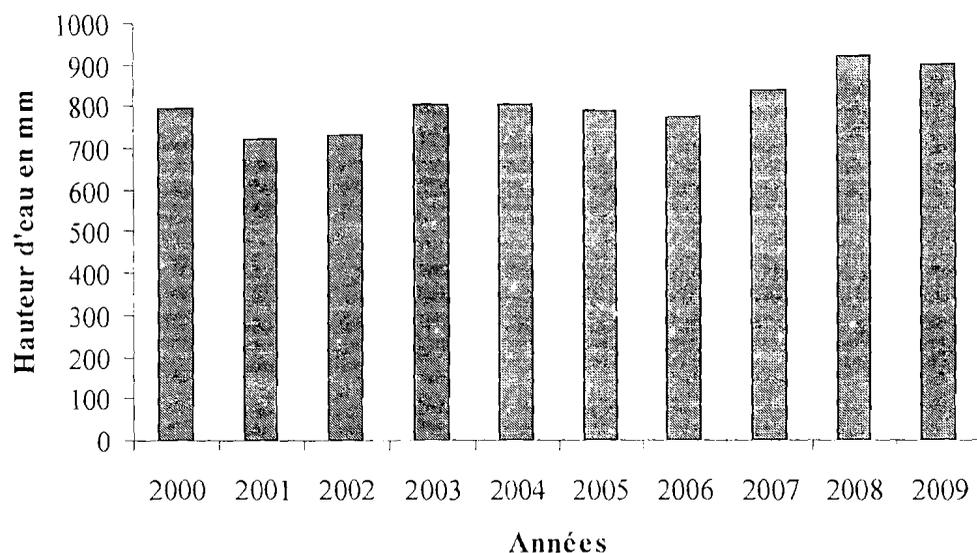


Figure III : Pluviosités des années 2000 à 2009 de Saria

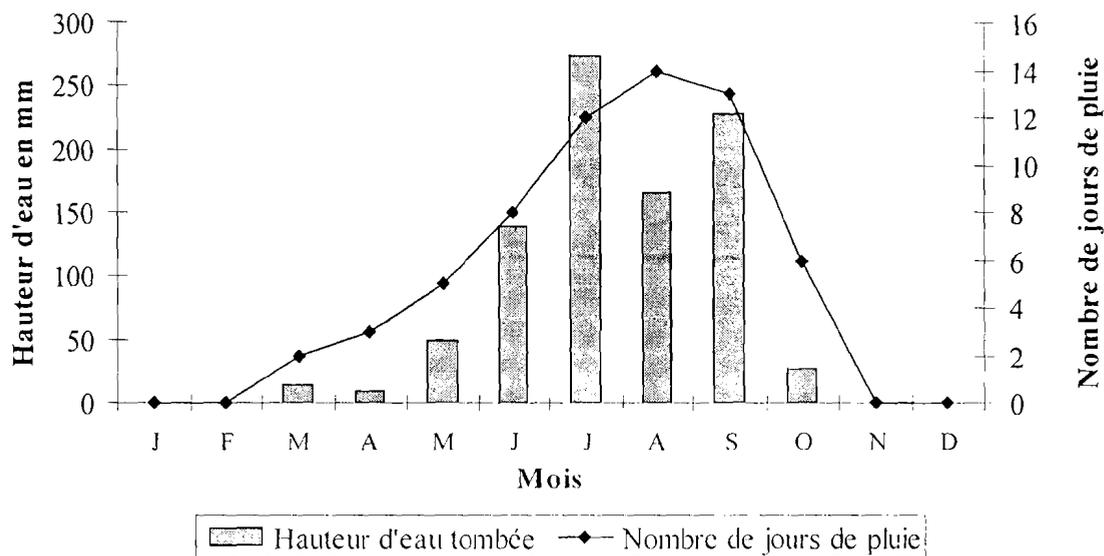


Figure IV : Pluviosité mensuelle de la campagne 2009 de Saria

2.2 Matériel d'étude

2.2.1 Matériel Végétal

La culture testée sur l'essai depuis sa mise en place (1980) est le sorgho. La variété de sorgho utilisée pour cette année est le sorgho Sariasso 11. C'est une variété vulgarisée par la station de recherche INERA/ Saria pour des zones à pluviosité comprise entre 600 et 900 mm. Elle a un cycle (semis maturité) de 110 à 115 jours.

Le sorgho est une graminée annuelle pouvant atteindre 5 m de haut, à talles uniques ou multiples partant de la base ou des nœuds de la tige. Il a des racines concentrées dans les 90 premiers cm du sol mais pouvant parfois s'étendre à une profondeur deux fois plus grandes. Ses inflorescences sont en panicules. Le sorgho est une plante bien adaptée à la sécheresse. Il tolère aussi bien des sols lourds que des sols légers mais sa culture réussit le mieux sur des sols limoneux ou limon sableux. La fourchette de pH supportée est de 5 à 8,5 (Brink et Belay, 2006).

C'est une culture importante sur le plan national car faisant partie des céréales les plus cultivées au Burkina Faso. En 2009, il occupe la première place avec une production de 1.683.456 tonnes sur le plan national.

2.2.2 Fertilisants

Les amendements organiques sont constitués de :

- La paille de sorgho ;
- Le fumier de bovin obtenu dans les étables de la station de l'INERA/Saria et composé d'un mélange de déjections et de pailles de céréales;
- Les composts aérobie obtenus par compostage pendant 6 mois du mélange 75 % de paille plus 25 % de bouse de vache ;
- Les composts anaérobies obtenus par digestion anaérobie pendant 3 mois du mélange 75 % paille, 25 % de bouse de vache.

Le tableau I montre les caractéristiques chimiques de ces amendements organiques. On note qu'ils diffèrent les uns des autres par leur niveau de décomposition et par leurs teneurs en éléments nutritifs. Ces différents amendements pourraient donc se distinguer les uns des autres quant à leurs effets sur les caractéristiques chimiques et biologiques du sol.

Les fertilisants chimiques utilisés comprennent l'urée (46 % de N), le super triple phosphate (45% de P_2O_5), le sulfate de potasse (50 % de K_2O).

Tableau I : Caractéristiques chimiques des différents amendements organiques

Amendements	Source	pH	C en %	N en %	P en g/kg	C/N
Paille	Sedogo (1981)	6,70	39,4	4,23	0,6	93
	Bonzi (1989)	-	42,5	0,60	-	70,85
Fumier	Sedogo (1981)	7,80	21,7	14,74	2,4	15
	Bonzi (1989)	-	22,32	1,27	-	17,57
C. Aér	Sedogo (1981)	6,65	32,5	7,62	0,9	43
	Bonzi (1989)	-	17	0,88	-	19,32
C. Anaér	Sedogo (1981)	6,45	42,2	5,19	0,7	81
	Bonzi (1989)	-	30,58	0,98	-	31,20

C. Aér : compost aérobie, C. Anaér : Compost anaérobie

2.3 Méthodes

2.3.1 Essai au champ

2.3.1.1 Dispositif expérimental

L'étude a été conduite sur le dispositif de longue durée, mis en place à Saria (Burkina Faso) depuis 1980. C'est un dispositif factoriel 5×2 comprenant six blocs et comparant l'effet de quatre types d'amendements organiques avec ou sans apport d'azote. Chaque parcelle élémentaire mesure $20,8 \text{ m}^2$ de superficie ($5,2 \text{ m} \times 4 \text{ m}$) (annexe 1). Une fumure uniforme de phosphore et de potassium est appliquée aux différents traitements. L'azote est apporté sous forme d'urée, le phosphore sous forme de super triple phosphate, le potassium sous forme de sulfate de potasse. Les différents traitements sont représentés dans le tableau II.

Tableau II : Traitements et doses d'éléments nutritifs apportés

Traitements	Doses d'éléments apportés
PK	30 unités de P_2O_5 , 30 unités de K_2O
Apport de NPK	60 unités de N, 30 unités de P_2O_5 , 30 unités de K_2O
Paille brut + PK	30 unités de P_2O_5 , 30 unités de K_2O , 10 t/ha de paille
Paille brut + NPK	60 unités de N, 30 unités de P_2O_5 , 30 unités de K_2O , 10 t/ha de paille
Fumier+ PK	30 unités de P_2O_5 , 30 unités de K_2O , 10 t/ha de fumier
Fumier + NPK	60 unités de N, 30 unités de P_2O_5 , 30 unités de K_2O , 10 t/ha de fumier
Compost aérobie+ PK	30 unités de P_2O_5 , 30 unités de K_2O , 10 t/ha compost
Compost aérobie + NPK	60 unités de N, 30 unités de P_2O_5 , 30 unités de K_2O , 10 t/ha compost
Compost anaérobie+ PK	30 unités de P_2O_5 , 30 unités de K_2O , 10 t/ha compost
Compost anaérobie + NPK	60 unités de N, 30 unités de P_2O_5 , 30 unités de K_2O , 10 t/ha compost

N : azote, P : phosphore, K : potassium

Notre étude n'a concerné que les traitements recevant l'azote c'est-à-dire les traitements :

- Apport de NPK (sans amendements organiques)
- Paille brut + NPK

- Fumier + NPK
- Compost aérobie + NPK
- Compost anaérobie + NPK

L'objectif de l'étude étant de comparer les effets des amendements organiques, il fallait bien s'assurer qu'au moins les éléments nutritifs majeurs N, P, K ne sont pas limitants. Les différences qui seront observées dans les paramètres mesurés seront donc attribuables à ces amendements organiques.

2.3.1.2 Les opérations culturales

Les opérations culturales ont débuté par un labour d'enfouissement des amendements organiques suivi d'un hersage en début de campagne. Le semis a été réalisé le 29 Juillet 2009 et un démariage à 3 semaines après semis.

Les opérations de désherbage ont consisté à un sarclage à deux semaines après semis et à un sarclage binage, 30 jours après semis.

La fertilisation minérale a consisté à un apport de super triple phosphate et de sulfate de potasse au semis. L'urée a été apportée en deux fractions ; une première fraction à 30 jours après semis et la deuxième fraction un mois plus tard.

2.3.1.3 Echantillonnage des sols

Les échantillons de sol ont été prélevés à 50, 70, 80, et 120 jours après semis à la tarière à cinq points de chaque parcelle élémentaire à la profondeur de 0-10 cm (Figure V). Un échantillon moyen a été réalisé en mélangeant les sols prélevés sur les cinq points. Les prélèvements ont été faits à une profondeur de 0-10 cm car c'est dans ces horizons que l'on rencontre le maximum de l'activité biologique.

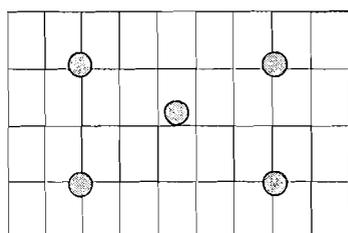


Figure V : Schéma de prélèvement du sol sur la parcelle

2.3.1.4 Paramètres mesurés

Les effets des différents amendements organiques sur la croissance et le rendement du sorgho ont été étudiés en mesurant les hauteurs des plantes de sorgho à 50 et 70 jours après semis et en déterminant les rendements grains et paille à la maturité du sorgho à 110 jours après semis. Les mesures des hauteurs aux deux dates ont porté sur les mêmes plantes. En effet quatre pieds de sorgho choisis de façon randomisée dans chaque parcelle utile de 9,6 m², ont été mesurés depuis le collet jusqu'à la dernière feuille nouvellement émergée.

2.3.2 Analyses de sols

Les analyses chimiques au laboratoire ont concerné les échantillons de sol prélevés sur les quatre premiers blocs de l'essai.

2.3.2.1 Détermination du pH du sol

La détermination du pH a été faite selon AFNOR (1981). Elle a d'abord consisté à faire agiter les échantillons de sol pendant une heure dans de l'eau distillée pour le pH_{eau} ou dans une solution molaire de chlorure de potassium (KCl) pour le pH_{KCl}. Le rapport prise d'essai/solution a été de 1/2,5. Le pH de l'ensemble sol-solution ainsi obtenu, a ensuite été directement lu au pH-mètre.

2.3.2.2 Dosage du carbone et de la matière organique du sol

La détermination du carbone du sol a concerné des échantillons de sol prélevés en fin de campagne. Elle a été faite selon la méthode Walkley and Black (1934). Cette méthode consiste à une oxydation à froid du carbone du sol avec du bichromate de potassium (K₂Cr₂O₇) 1N en présence de H₂SO₄ concentré. L'excès du bichromate non réduit est dosé par du sel de Mohr Fe(SO₄)₂(NH)₂ en présence d'indicateur coloré. La teneur en carbone est obtenue par la formule suivante :

$$C \text{ (g/kg)} = N (V1 - V2) * 3,9 / PE$$

V1 est le volume de sel de mohr utilisé pour le blanc

V2 est le volume de sel de mohr utilisé pour doser l'échantillon de sol

N est la normalité de la solution de sel de mohr

PE est le poids de la prise d'essai

La teneur en matière organique est obtenue par la formule suivante :

$$\text{MO (\%)} = \text{C (cn g/kg)} * 0,1724$$

Le coefficient 1,724 provient du fait que la matière organique est composée d'environ 58 % de carbone

2.3.2.3 Extraction et dosage du phosphore Bray I

L'extraction du phosphore assimilable a été faite selon la méthode Bray I (Bray and Kurtz, 1945). Cette méthode consiste à extraire les formes de phosphore soluble dans les acides en grande partie celle liée au calcium et une portion liée à l'aluminium et au fer par l'acide chlorhydrique en présence de fluorure d'ammonium. On a utilisé le rapport prise d'essai/solution d'extraction de 1/7. Les filtrats obtenus sont alors analysés par colorimétrie au spectrophotomètre. La densité optique des filtrats est fonction de la concentration en ions phosphore initialement présents.

2.3.2.4 Détermination de la biomasse microbienne

La détermination a été faite selon la méthode de fumigation-incubation (Jenkinson et Powlson, 1976), et a concerné les échantillons de sol prélevés en fin de campagne. La fumigation a consisté à déposer pour chaque traitement 25g de sol humidifié au 2/3 de la capacité maximale de rétention d'eau dans un dessiccateur contenant du chloroforme qui a été débarrassé de l'éthanol après plusieurs lavages à l'eau. A l'aide d'une pompe à vide, un vide a été créé dans le dessiccateur en vue de saturer l'atmosphère par les vapeurs de chloroforme. Après 24 heures de fumigation, les vapeurs de chloroforme ont été évacuées. Les échantillons de sol fumigés sont mis à incuber pendant 14 jours, et le CO₂ dégagé a été mesuré au 7^è et au 14^è jour. Pour l'incubation, on place les échantillons de sol fumigés dans un bocal d'un litre contenant un flacon de 20ml de soude (NaOH 0,1N) qui servira à piéger le CO₂ dégagé et un flacon de 20 ml d'eau distillée pour humidifier l'enceinte. On ferme hermétiquement le bocal et on les laisse incuber dans une étuve à 28°C. Le dosage du CO₂ piégé par la soude se fait par titrimétrie en présence de la phénophtalécine comme indicateur coloré. Avant le dosage, on fait précipiter le CO₂ de la solution de soude par 3 ml d'une solution de chlorure de baryum.

La quantité Q de CO₂ dégagée est obtenue par la formule suivante:

$$Q \text{ (mg)} = [V_{\text{HCl}} \text{ (blancs)} - V_{\text{HCl}} \text{ (traitement)}] \times 2,2$$

$V_{\text{HCl}} \text{ (blancs)}$ = volume d'acide chlorhydrique utilisé pour neutraliser les 20 ml de soude du blanc,

$V_{\text{HCl}} \text{ (traitement)}$ = volume d'acide chlorhydrique utilisé pour le dosage du traitement (échantillon de sol);

Le carbone de la biomasse microbienne a été estimé à l'aide de la formule suivante:

$$\text{BM (mg)} = \frac{(F_{0-7} - F_{8-14})}{K_c}$$

F_{0-7} est le CO_2 dégagé entre le premier et le septième jour; F_{8-14} est le CO_2 dégagé entre le huitième et quatorzième jour;

K_c est égale 0,41 coefficient de proportionnalité représentant la fraction minéralisable de carbone en CO_2 proposé par Chaussod *et al.* (1986).

2.3.2.5 Extraction et dosage du phosphore résine et du phosphore microbien

La quantité totale de phosphore contenue dans la biomasse microbienne a été estimée par la méthode de fumigation-extraction selon Kouno *et al.* (1995). Elle a concerné les échantillons de sols humides prélevés à 50, 70, 80 et 120 jours après semis.

La fumigation consiste à faire éclater les parois microbiennes par l'hexanol pour libérer le contenu cellulaire.

Des échantillons de sol ont été agités avec des lamelles de résines échangeuses d'anions dans : (1) eau distillée, (2) eau distillée + hexanol, (3) eau distillée + solution de phosphore à concentration connue pour corriger la réabsorption par le sol du phosphore microbien libéré. Le rapport sol/eau est de 1/10. Le phosphore des solutions est piégé par les lamelles de résine et ensuite extrait par une solution de HCl/NaCl 0,1 M. Après extraction on dose le phosphore contenu dans la solution de HCl/NaCl par colorimétrie au spectrophotomètre. Le phosphore microbien par la formule suivante :

$$P \text{ microbien (mg)} = [P_f \text{ (mg)} - P_{nf} \text{ (mg)}] / \text{Taux de recouvrement}$$

P_f = la quantité de phosphore mesurée dans l'échantillon de sol fumigé

P_{nf} = la quantité de phosphore mesurée dans l'échantillon de sol non fumigé

Le taux de recouvrement est la proportion de phosphore microbien libéré et non réadsorbé par le sol. Il est calculé par la formule suivante :

Taux de recouvrement = (P mesuré dans l'échantillon de sol ayant reçu du phosphore – P mesuré dans l'échantillon de sol non fumigé) / la quantité de P ajouté

Le phosphore contenu dans les échantillons de sol non fumigés représente le phosphore résine du sol (phosphore disponible du sol). L'extraction du phosphore disponible du sol par les résines échangeuses d'anions repose sur le principe que ces résines miment l'adsorption du phosphore du sol par les racines (Frossard *et al.*, 2004).

2.3.3 Méthodes d'analyses statistiques

Les résultats obtenus ont été soumis à une analyse de variance (ANOVA) (logiciel XL STAT). Les moyennes ont été comparées par le test de Newman au seuil de 5 %.

Les tests de corrélation de Pearson par le même logiciel ont été réalisés afin de déterminer les corrélations entre les propriétés chimiques et biologiques de sol.

L'analyse en composantes principales entre les rendements et les propriétés chimiques et biologiques du sol a été effectuée par le Logiciel SAS 9.2

Chapitre III Résultats et Discussion

3.1 Effet des amendements organiques sur le pH et la teneur en matière organique du sol

3.1.1 Résultats

Le tableau III montre que les différents sols sont acides avec des valeurs de pH_{eau} variant de 4,8 à 5,8 et ceux pH_{KCl} de 4,2 à 5,2. Les valeurs du pH sont significativement plus élevées avec l'application des substrats organiques qu'en présence d'engrais minéral seul. Les sols traités avec le fumier et le compost aérobie ont des pH significativement plus élevés que les sols traités avec la paille et le compost anaérobie.

Quelque soit le traitement, les teneurs en matière organique des sols restent inférieures à 1% (Tableau III). Comparativement à la teneur en matière organique à la mise en place de l'essai, l'apport des amendements organiques ont maintenu ou améliorer le statut organique du sol. L'apport de la fumure minérale seule par contre, a conduit à une baisse de la teneur en matière organique de 30 %. On note des teneurs significativement plus élevées avec les différents amendements organiques comparativement à la fumure minérale seule. La paille, le compost anaérobie, le compost aérobie et le fumier entraînent une augmentation de la teneur en matière organique du sol par rapport au témoin, respectivement de 39 ; 39 ; 66 et 93 %.

Tableau III Teneurs en matière organique et le pH des sols prélevés en fin de campagne

Traitements	pH_{eau}	pH_{KCl}	MO en %
NPK	4,8 c	4,2 c	0,33 c
Paille + NPK	5,5 ab	4,8 ab	0,46 b
Fumier + NPK	5,7 a	5,2 a	0,64 a
Compost aérobie + NPK	5,8 a	5,1 a	0,55 b
Compost anaérobie + NPK	5,2 b	4,6 b	0,46 b
Valeurs à la mise en place de l'essai (Sedogo, 1981)	-	-	0,47
Probabilité	0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Signification	IIS	HS	HS

Les traitements accompagnés d'une même lettre ne sont significativement différents au seuil de 5 %.
HS : Hautement significatif

3.1.2 Discussion

L'analyse des différents sols montre qu'ils sont acides et ont des teneurs faibles en matière organique, ce qui est la caractéristique générale des sols ferrugineux tropicaux. Les travaux de Pallo *et al.* (1989) indiquent en effet que les sols ferrugineux tropicaux ont des teneurs en matière organique inférieures à 2 % dans 70 % des cas.

Le pH et les teneurs en matière organique du sol sont significativement plus élevés sur les sols traités avec les amendements organiques que sur le sol ayant reçu la fumure minérale seule.

Le pH donne une indication sur l'acidité des différents sols qui influence la disponibilité en éléments nutritifs et l'activité biologique du sol pour les plantes (Davet, 1996 ; Dubus, 1997 ; Calvet, 2003). Le pH optimum pour la disponibilité des éléments nutritifs et l'activité biologique se situe entre 6,5 et 7. Les pH élevés obtenus avec les amendements organiques sont dus au fait que la matière organique permet de fixer certains ions acidifiant tels que l'aluminium, ce qui réduit leurs teneurs dans la solution du sol. Lompo, (2009) note en effet une diminution de la teneur en aluminium échangeable suite à des apports de fumier. Naramabuye *et al.* (2007) notent également au cours d'essai d'incubation d'un sol acide en présence de résidus organiques une augmentation du pH et une diminution de l'aluminium soluble du sol par rapport au témoin sans apport. Mabuhay et al (2006) notent également avec l'application de fiente de volaille à un sol érodé une augmentation du pH.

La matière organique du sol, quant à elle représente une source de carbone pour la nutrition et la prolifération des microorganismes du sol (Chaussod, 1986). Elle fournit une grande partie du phosphore pour les plantes (Bationo *et al.*, 1998).

Nos résultats montrent le rôle des résidus organiques dans l'amélioration de la teneur en matière organique du sol, confirmant les travaux de nombreux auteurs. En effet, les travaux de Sedogo (1981 ; 1993) et Lompo (2009), au Burkina Faso sur des sols ferrugineux tropicaux ont montré que la fumure organo minérale permet de maintenir à long terme la teneur en carbone des sols sous culture, contrairement à la fumure minérale seule qui entraînent une baisse du taux de carbone des sols, comme le montre nos résultats. Li *et al.* (2008) ont également noté sur des sols en Chine, que l'apport d'amendement organique permet d'améliorer la teneur en matière organique des sols. Ces auteurs notent des teneurs en matières organiques de 19 à 28 g/kg de sol obtenues avec le fumier et les résidus de culture contre des teneurs de 15 et 18 respectivement pour le témoin sans apport et le sol traité avec la fumure minérale.

L'analyse de nos résultats montre que les teneurs en matière organique du sol diffèrent selon les substrats. Les sols traités avec le substrat ayant la plus faible valeur de C/N présente une

teneur en matière organique plus élevée. Les travaux de Samahadthai *et al.* (2010) sur des sols tropicaux sableux ont également noté que l'accumulation du carbone est favorisée par un rapport C/N faibles des substrats. Ils notent une corrélation négative entre le rapport C/N des substrats et l'accumulation du carbone dans les sols ($r = -0,84$; $P < 0,01$).

3.1.3 Conclusion

La fumure organique sous forme de paille, de fumier et de compost aérobie et anaérobie permet d'améliorer le pH du sol. Elle permet de maintenir, ou d'améliorer le statut organique des sols comparativement à la fumure minérale exclusive qui entraîne une baisse de cette teneur. L'amélioration de la teneur en matière organique est d'autant plus élevée que le type de substrats apporté est bien décomposé tel que le fumier. Les teneurs en matière organique plus importantes et les pH moins acides observés avec les substrats organiques sont des signes probables d'une meilleure activité biologique et d'une meilleure disponibilité du phosphore dans ces sols.

3.2 Effet des amendements organiques sur le phosphore disponible du sol

3.2.1 Résultats

3.2.1.1 Effet sur le phosphore disponible Bray I

La figure VI montre les teneurs en Phosphore assimilable (Bray I) des différents traitements. On note des teneurs élevées en phosphore Bray I sur tous les traitements (teneurs supérieures à 20 mg/kg de sol). Les teneurs moyennes varient de 29 à 36 mg/kg de sol. Les résultats montrent également que les traitements ont une influence significative sur le phosphore Bray du sol. Les traitements se classent dans l'ordre suivant : Fumier > Compost anaérobie > Compost aérobie > Fumure minérale > Paille. On note une augmentation de 27 %, 19 %, 21 % respectivement pour le fumier, le compost aérobie et le compost anaérobie par rapport au témoin sans apport. L'apport de paille de sorgho n'a pas significativement amélioré le taux de phosphore assimilable du sol.

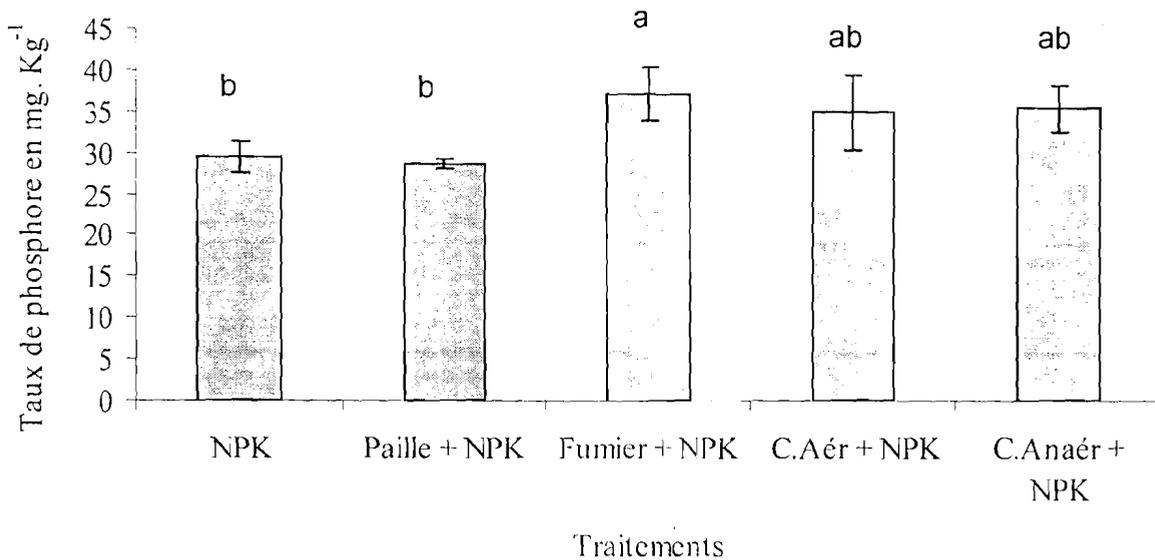


Figure VI : Teneurs en Phosphore Bray I des sols prélevés en fin de campagne

Les traitements accompagnés d'une même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %. Les barres verticales représentent les déviations standard pour chaque traitement.

C.Aér : compost aérobie, C.Anaér : Compost anaérobie

Probabilité P = 0,010

3.2.1.2 Evolution du phosphore résine au cours de la culture

L'analyse de l'évolution des teneurs en phosphore résine au cours de la culture (figure VII) montre des teneurs variant entre 11,1 et 23,1 mg kg⁻¹ (16,3 mg kg⁻¹ en moyenne). Les plus grandes teneurs en phosphore résine sont obtenues avec le fumier au cours de la culture. Les analyses statistiques montrent une différence significative entre le fumier et les autres traitements à 70 JAS, 80 JAS et 120 JAS. Les sols traités avec les composts aérobie et anaérobie ont une teneur en phosphore résine qui fluctue au cours du temps. Cependant ils se distinguent significativement de la fumure minérale seule à 70 JAS (correspondant à la floraison). Les sols traités avec la paille ne se distinguent pas significativement de la fumure minérale seule pendant tout le cycle de la culture.

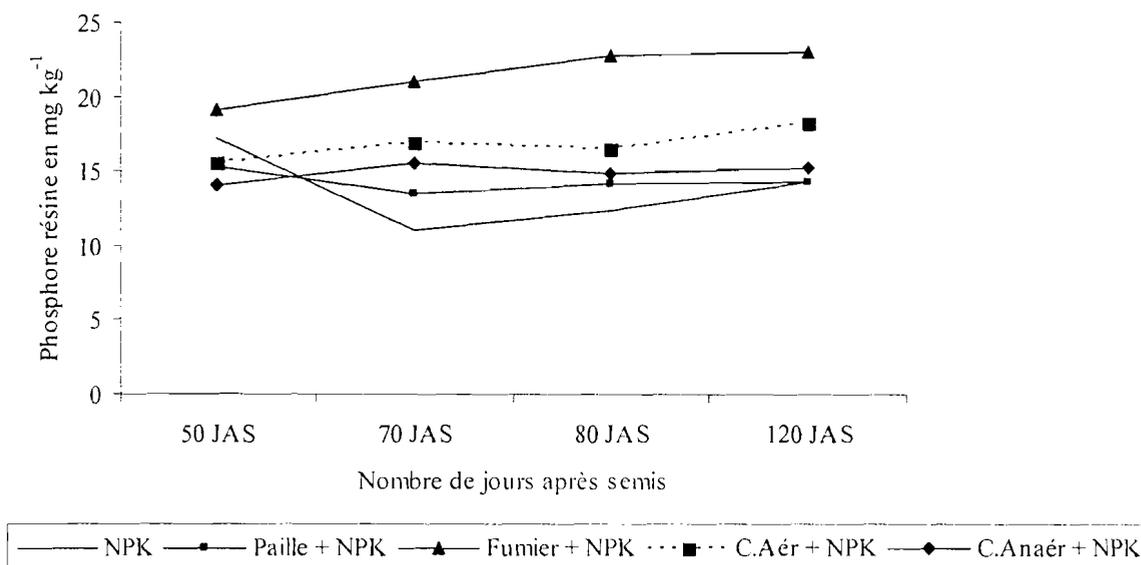


Figure VII : Evolution du phosphore résine au cours de la saison culturale

C.Aér : compost aérobie, C.Anaér : Compost anaérobie

3.2.1.3 Relation entre le pH, la teneur en matière organique et la disponibilité en phosphore des sols.

L'analyse du tableau IV montre une corrélation significativement positive entre la teneur en phosphore Bray I et la teneur en matière organique du sol ($r = 0,57$; $P = 0,01$). Il en est de même pour la teneur en phosphore résine et la teneur en matière organique du sol ($r = 0,73$; $P = 0,0001$). On note une corrélation significativement positive entre le pH et la teneur en phosphore résine ($r = 0,46$; $P = 0,03$). Il n'y a pas de corrélation entre les teneurs en phosphore Bray et le pH.

Tableau IV : Coefficients de corrélation de Pearson entre les propriétés chimiques et la disponibilité en phosphore du sol (P = 5 %)

	pH _{cau}	MO
P Bray I	0,39 (p=0,11)	0,57 (p=0,014)
P résine	0,46 (p=0,038)	0,73 (p = 0,0001)

3.2.2 Discussion

Le phosphore Bray I et le phosphore résine représentent le phosphore disponible du sol, extrait par deux méthodes différentes.

On note des teneurs en phosphore Bray I élevées dans tous les traitements. Ces grandes teneurs sont probablement dues au phosphore apporté sous forme de triple super phosphate aux sols chaque année et aussi aux phosphores des différents substrats. Ces teneurs montrent que le phosphore n'est pas limitant au niveau de nos différents traitements. En effet, le phosphore n'est pas un facteur limitant pour la production végétale pour des valeurs de P Bray I de 10 à 20 mg/Kg de sol (Compaoré *et al.*, 2003). Ces teneurs sont nettement supérieures aux besoins des plantes, il pourrait éventuellement avoir des pertes de phosphore par lixiviation vers les horizons profonds des sols et aussi par ruissellement.

Les différents substrats à l'exception de la paille de sorgho ont amélioré la teneur en phosphore disponible Bray I du sol par rapport à la fumure minérale seule avec une meilleure teneur obtenue avec le fumier. Les travaux de Lompo (2009) notent que l'apport de fumier à la dose de 5 t/ha tous les deux ans permettait d'accroître de 17 % la teneur en phosphore Bray I par rapport aux sols traités avec la fumure minérale seule. Hafner *et al.* (1993) notent également une amélioration du phosphore Bray I du sol suite à un apport de résidus culturaux sous forme de paille de mil. Ces teneurs en phosphore Bray I élevées, constatées avec le fumier et les composts peuvent s'expliquer par le fait que ces composts contiennent soit du phosphore sous forme minérale qui augmente le phosphore disponible du sol à court terme soit sous forme organique qui augmente le phosphore disponible du sol après minéralisation sous l'action des microorganismes du sol. Cette minéralisation a été probablement faible avec la paille due au rapport C/N élevé de ce dernier, d'où ses effets non significatifs sur la disponibilité du phosphore du sol.

On note une corrélation positive entre la teneur en matière organique du sol et la teneur en phosphore Bray ($r= 0,57$; $P = 0,01$). Cela explicite le rôle important de la matière organique endogène du sol sur la disponibilité du phosphore. En effet Bationo *et al.* (1998) soulignent que la matière organique du sol représente 20 à 80 % du phosphore du sol. Dans le même sens, dans le Mémento de l'agronome, (2002), il est noté que la matière organique du sol fournissait au moins 50 % du phosphore assimilable et beaucoup plus dans les sols à fort pouvoir fixateur. Les apports de matières organiques exogènes sont donc nécessaires pour maintenir la teneur matière organique du sol afin d'améliorer la disponibilité du phosphore des sols.

L'analyse des données sur la teneur en phosphore résine du sol montre les mêmes tendances que ceux observés avec le phosphore Bray I. On note aussi que la teneur en phosphore résine n'est pas constante au cours de la culture. Ces variations peuvent s'expliquer par des prélèvements par la plante ou par l'immobilisation par les microorganismes. Elles peuvent également être dues à des gains, suite à la minéralisation de la matière organique. Oberson et Joner (2005) notent dans certains cas, que le phosphore immobilisé par les microorganismes évolue en sens opposé à celui du phosphore disponible du sol. Quand le phosphore microbien augmente le phosphore disponible baisse.

L'analyse de la courbe d'évolution du phosphore résine montre que les composts et le fumier qui ne se distinguent pas du témoin à 50 JAS, ont amélioré le phosphore résine à 70 JAS et même à 80 JAS pour le fumier. Ces différentes dates correspondent à la période de floraison et à la formation des grains. Cela pourrait s'expliquer par une libération progressive du phosphore au cours de la culture. L'amélioration de la teneur en phosphore résine au moment de la floraison est très intéressante dans la mesure où cela pourrait permettre une bonne formation des grains. Le phosphore a en effet un rôle essentiel dans la fécondation et la mise en fruit (Mémento de l'agronome, 1991).

3.2.3 Conclusion

L'apport des substrats organiques bien décomposés tels que le fumier et les composts améliore la disponibilité du phosphore des sols. L'apport de 10 t/ha/an de ces substrats accroît la teneur en phosphore Bray I et la teneur en phosphore résine du sol. Leur apport est donc une alternative pour améliorer la disponibilité en phosphore des sols. Cependant les doses de 10t/ha/ an avec les fumures minérales aux doses apportées pourraient induire des pertes de phosphore dans le sol car la quantité de phosphore disponible apportée est largement supérieure aux besoins de la plante.

3.3 Effet (à long terme) des amendements organiques sur la biomasse microbienne et le phosphore microbien du sol

3.3.1 Résultats

3.3.1.1 Effet sur la biomasse microbienne du sol

La figure VIII présente la biomasse microbienne du sol des différents traitements. Les valeurs de la biomasse microbienne varient de 179 à 346 mg/kg. Les stratégies de fertilisations organo minérales ont significativement affecté la biomasse microbienne. Les biomasses microbienne moyennes des sols se présentent dans l'ordre suivant : compost anaérobie > fumier > compost aérobie > fumure minérale seule > paille. L'apport de fumier et de composts a amélioré de façon significative la biomasse microbienne du sol de 59, 49, 94 % respectivement pour le fumier, le compost aérobie, le compost anaérobie. L'apport de paille n'a pas amélioré de façon significative la biomasse microbienne.

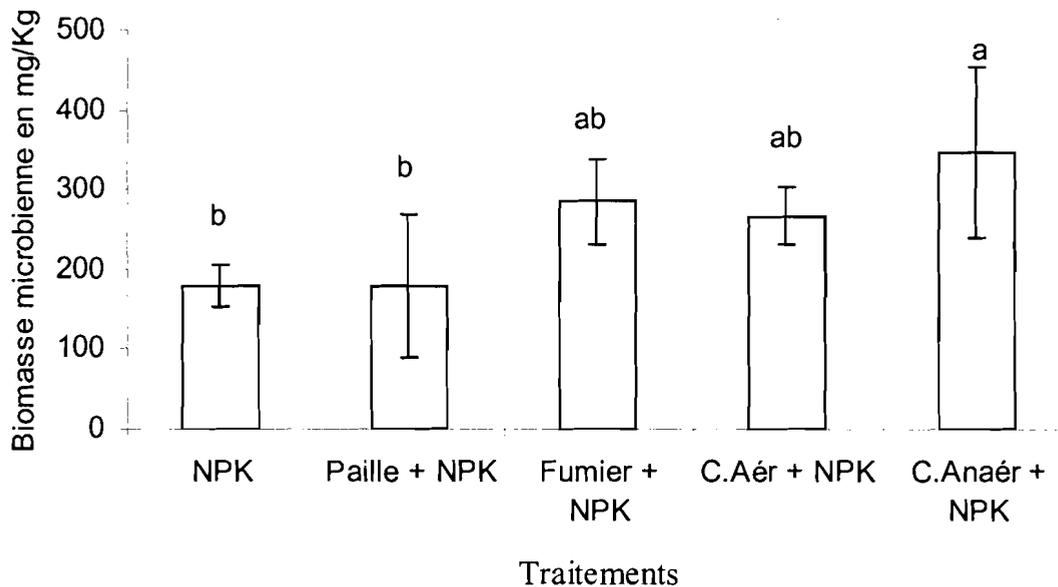


Figure VIII : Biomasse microbienne des sols prélevés en fin de campagne

Les traitements accompagnés d'une même lettre ne sont significativement différents au seuil de 5 %. Les barres verticales représentent les déviations standard pour chaque traitement.

C.Aér : compost aérobie, C.Anaér : Compost anaérobie

P = 0,028

3.3.1.2 Evolution du phosphore microbien du sol

La figure IX montre des teneurs en phosphore microbien généralement faibles au cours de la culture (1,7 mg P kg⁻¹ en moyenne) variant entre 0,2 et 7,6 mg p kg⁻¹. La plus grande valeur est obtenue avec le fumier qui se distingue significativement des autres traitements à 50 JAS (7,6 mg p kg⁻¹). Cette teneur baisse par la suite pour atteindre des valeurs de 0,5 mg p kg⁻¹ à 120 JAS.

Les composts aérobie et anaérobie induisent un taux de phosphore microbien qui fluctue au cours du temps. Ce taux est plus élevé que celui de la fumure minérale seule en moyenne durant tout le cycle de la culture. Les analyses statistiques montrent une différence significative entre ces composts et la fumure minérale seule à 70 JAS et 120 JAS.

La paille par rapport au témoin, a significativement augmenté le taux de phosphore microbien à 70 JAS et à 80 JAS.

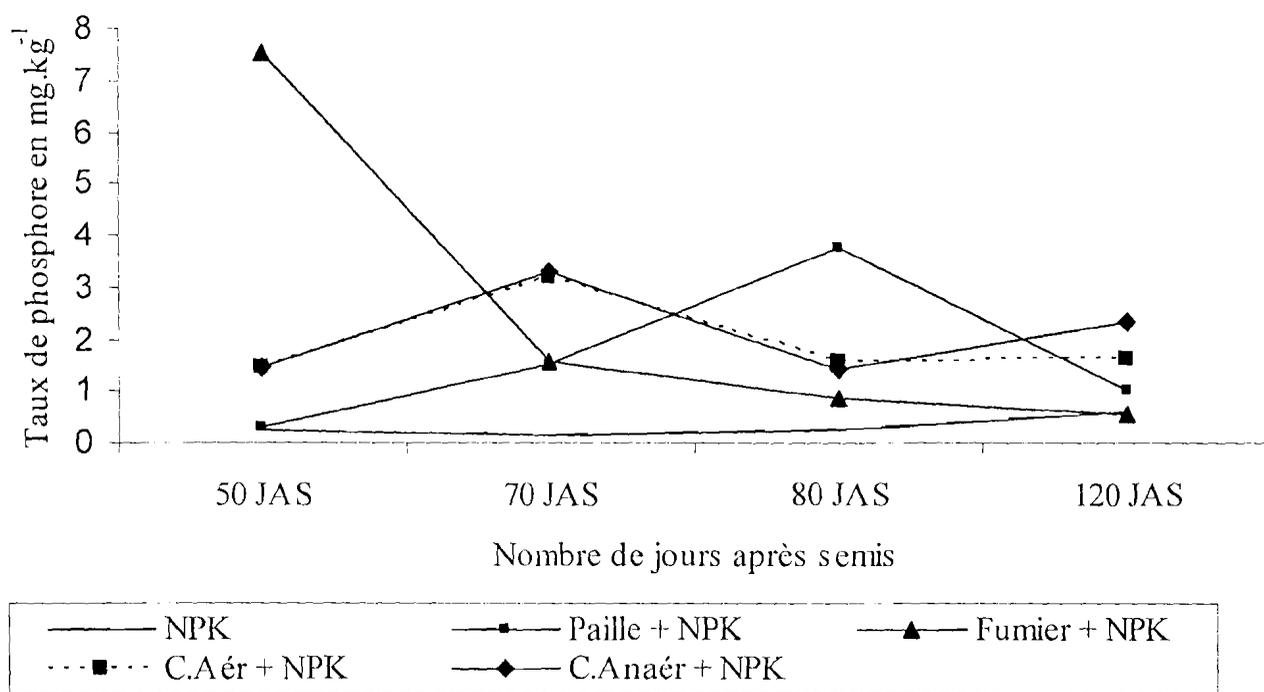


Figure IX : Evolution du phosphore microbien des sols

C.Aér : compost aérobie, C.Anaér : Compost anaérobie

3.3.2 Discussion

L'apport de fumier et de compost a amélioré la biomasse microbienne du sol. L'effet des substrats organiques sur la biomasse microbienne est connu. La matière organique est une source de nutriments pour les microorganismes et permet ainsi leur prolifération (Zombré 2006). Kaur *et al.* (2005) notent en Inde que l'application de fumier, de fiente de volaille seule ou combinée à la fertilisation chimique, améliorait l'activité de la flore microbienne du sol. Li *et al.* (2008) sur des sols en Chine, ont aussi observé des valeurs de biomasses microbiennes plus élevées au niveau des sols ayant reçu en plus de la fertilisation minérale du fumier de porc (451 mg/kg), de la paille de maïs (281 mg/kg) et des valeurs faibles au niveau des sols non traités (96 mg/kg) et des sols ne recevant que la fumure minérale (214 mg/kg). Mabuhay *et al.* (2006) notent également des valeurs de biomasse microbienne 3,2 et 2,9 fois plus élevées respectivement avec la fiente de volaille (856,7 mg/kg de sol) et la fumure minérale (770 mg/kg) comparativement au sol non amendé (298,3 mg/kg).

L'apport d'amendement organique sous forme de paille de sorgho n'améliore pas la biomasse microbienne bien qu'ayant amélioré la teneur en matière organique totale du sol. Ce comportement de la paille pourrait s'expliquer par sa teneur très élevée en carbone et son faible niveau de décomposition (C/N élevé). Les apports organiques améliorent la biologie du sol, toutefois, cela va dépendre des caractéristiques chimiques des substrats tels que leur rapport C/N. Li *et al.* (2008) notent que le rapport C/N des substrats pouvait influencer la composition de la communauté microbienne. Ils notent des valeurs de biomasse microbienne plus faible avec l'apport de paille de maïs et de blé comparativement au fumier.

Cependant cette hypothèse reste à compléter avec des analyses de la composition de la matière organique des substrats. En effet Nacro (1997) note que les microorganismes du sol ne réagissent pas de la même manière vis-à-vis des différentes sources de carbone. Il note que la cellulose, la gélatine, la lignine, le tanin sont lentement dégradés (6 à 19 % de carbone minéralisé en 14 jours) comparativement au glucose et à la leucine (43 à 49 %). Dilly (2004) a également fait les mêmes remarques. Il note au cours d'essai d'incubation, une augmentation de la biomasse microbienne carbonée et une stimulation de la respiration du sol dans l'ordre suivant : glucose > cellulose > acide humique.

L'analyse de l'évolution de la teneur en phosphore microbien montre des teneurs en général faibles (1,7 mg P. Kg⁻¹ en moyenne). Cela est imputable à la teneur en matière organique faible du sol. La matière organique est en effet une source de carbone pour le développement des organismes microbiens hétérotrophes (Nacro, 1997 ; Zombré, 2006). Tous les substrats améliorent mais de manière différentes la teneur en phosphore microbien du sol. Damodar *et*

al. (2005) soulignent également une augmentation de la teneur en phosphore microbien du sol suite à l'apport de résidus de blé et de soja.

Comme noté plus haut, cela pourrait s'expliquer par la capacité de ces substrats à améliorer les propriétés chimiques du sol tels que la teneur en matière organique. Le pH des sols pourrait également expliquer les teneurs en phosphore microbien plus élevés dans les sols traités avec les divers substrats que chez le témoin. Le pH exerce un effet sur l'activité et la composition de la communauté microbienne (Davet, 1996 ; Calvet, 2003).

Cela pourrait être intéressant si la libération ultérieure de ce P microbien coïncide avec les moments de forts besoins en phosphore de la plante. On note en effet avec le fumier qui a une grande teneur en phosphore microbien à 50 JAS suivi d'une baisse, une teneur élevée en Phosphore disponible.

Aussi les fluctuations de P microbien observées au cours de la saison pluvieuse sont probablement dues aux processus de minéralisation et immobilisation dans les sols.

3.3.3 Conclusion

Les composts et le fumier s'avèrent être des sources de matières organiques pouvant être utilisées pour améliorer la qualité biologique des sols. Incorporés à la fumure minérale, ils améliorent la biomasse microbienne du sol de 49 à 94 %. Ils améliorent également les teneurs en phosphore microbien du sol. La paille de sorgho quand à elle n'améliore pas la biomasse microbienne du sol. Le niveau de décomposition des substrats détermine donc leurs capacités à améliorer la biomasse microbienne du sol.

3.4 Effet des amendements organiques sur la croissance et le rendement du sorgho

3.4.1 Résultats

L'analyse du tableau V montre que les différents amendements organiques ont significativement amélioré la croissance du sorgho à 50 JAS et à 70 JAS par rapport au témoin qui ne reçoit que la fumure minérale seule.

A 50 JAS, le fumier et le compost aérobie forment un groupe homogène et ont le plus amélioré la croissance du sorgho. La paille a le moins amélioré la croissance du sorgho comparativement aux autres substrats organiques.

A 70 JAS on observe les mêmes tendances. Le fumier et les composts forment un groupe homogène et ont significativement amélioré la croissance du sorgho par rapport à la paille.

L'analyse du tableau montre également des rendements grains et paille en général faibles pour tous les traitements. On note des rendements grains variant de 26 à 926 Kg/ Ha et de rendement pailles variant de 381 à 2355 Kg/ Ha.

Les apports organiques ont significativement augmenté les rendements. Sur les rendements grains les traitements se présentent dans l'ordre suivant : Fumier > Compost aérobie > Compost anaérobie > Paille > Fumure minérale. Il en est de même pour les rendements paille. Le fumier et les composts ont significativement amélioré le rendement grains du sorgho avec une meilleure valeur obtenue avec le fumier. La paille ne se distingue pas significativement du témoin mais néanmoins on distingue une faible amélioration.

Les différents substrats ont augmenté de façon significative les rendements paille du sorgho avec une meilleure performance du fumier. Les composts et la paille forment un groupe homogène quant à l'amélioration des rendements paille.

L'analyse des moyennes des rendements grains sur huit dernières campagnes montre également les mêmes tendances (Tableau VI).

Tableau V : Effet des différents amendements organiques sur la croissance et le rendement du sorgho

Traitements	Hauteur des plants à 50 JAS en cm	Hauteur des plants à 70 JAS en cm	Rendements grains en Kg/ Ha	Rendements pailles en Kg/ Ha
NPK	25 c	47 b	26 c	381 b
Paille + NPK	31 bc	67 ab	134c	1228 ab
Fumier + NPK	55 a	95 a	926a	2355 a
C. Aér + NPK	53 a	88 a	476 b	1547 ab
C. Anaér + NPK	42 ab	92 a	298bc	1447 ab
Probabilité P	0,001	0,011	< 0,0001	0,006

Les traitements accompagnés d'une même lettre ne sont significativement différents au seuil de 5 %.

C.Aér : compost aérobie, CAnaér : Compost anaérobie

Tableau VI : Rendements grains en Kg/ Ha sur huit dernières campagnes

Traitements	2000	2001	2002	2003	2005	2006	2007	2008	Moyennes
N P K seul	894	1007	625	2483	981	538	667	1094	1036
Paille + N P K	1345	2222	1458	3021	2378	608	778	1597	1676
Fumier + N P K	946	1806	1875	3681	3056	1918	1460	1762	2063
C. Aér + N P K	1059	1840	1962	3698	2587	1753	1255	1840	1999
C. Anaér + N P K	964	1354	1597	3637	2708	1085	1403	1172	1740

C.Aér : compost aérobie, CAnaér : Compost anaérobie

3.4.2 Discussion

L'apport à long terme des différents substrats organiques associé à la fumure minérale a amélioré la croissance du sorgho par rapport au témoin ne recevant que la fumure minérale seule. Cela s'explique par les propriétés de ces substrats à améliorer la disponibilité en éléments de croissance comme le phosphore. En effet, ces substrats à l'exception de la paille augmentent le taux de phosphore résine ainsi que le phosphore Bray I (Figure V et VI). Aussi, ces substrats ont augmenté la teneur en matière organique du sol, éléments importants pour une bonne structuration du sol et une bonne activité microbienne du sol.

Les rendements sont en général faibles par rapport à la moyenne des rendements sur huit campagnes. Cela est certainement dû au retard de semis qui n'a pas permis à la culture de profiter de façon efficiente à l'eau des pluies.

Les composts et le fumier ont augmenté de façon significative les rendements paille et grains du sorgho par rapport au témoin ne recevant que la fumure minérale seule. Cela souligne le rôle important des apports organiques à maintenir la production des sols à un niveau acceptable (Sedogo, 1993). La mise en culture des sols ferrugineux tropicaux entraîne une baisse du taux de matière organique, une acidification des sols et une baisse des rendements. L'apport de substrats organiques permet de ralentir ce processus d'acidification et de baisse

de la teneur en matière organique des sols. On note en effet que l'apport des substrats améliore le pH et la teneur en matière organique des sols.

L'apport de paille n'a augmenté de façon significative que les rendements paille. L'augmentation des rendements grains comparativement à la fumure minérale seule n'est pas significative. Cela est probablement due au fait que l'apport de paille n'a pas augmenté les teneurs en éléments nutritifs du sol tels que le phosphore qui est très important à la formation des fleurs et des grains (Marschner, 1995).

3.4.3 Conclusion

L'apport d'amendements organiques dans les sols permet leur gestion durable car améliorant à long terme les rendements agricoles. Toutefois, ces amendements doivent être de bonne qualité. Les composts et le fumier de bovin jouent bien ce rôle sécurisant. La paille de sorgho quant à elle, peut dans certains cas ne pas améliorer la productivité des sols agricoles.

3.5 Relations entre les différents paramètres chimiques, biologiques et les rendements agricoles

3.5.1 Résultats

L'analyse en composantes principales entre les caractéristiques chimiques et biologiques du sol et les rendements grains est illustrée par la figure X. Les deux axes expliquent ensemble 82.51 % de la variabilité totale avec 68.28 % et 14.23 % respectivement pour l'axe F1 et l'axe F2. Tous les paramètres considérés sont positivement corrélés avec le premier axe. On note que le rendement grain du sorgho est beaucoup plus corrélé avec les teneurs en matière organique et le pH du sol qu'avec le phosphore disponible et la biomasse microbienne du sol. La distribution des différents traitements montre qu'ils sont classés dans l'ordre fumier > compost aérobie > compost anaérobie > paille > NPK suivant un gradient des paramètres mesurés.

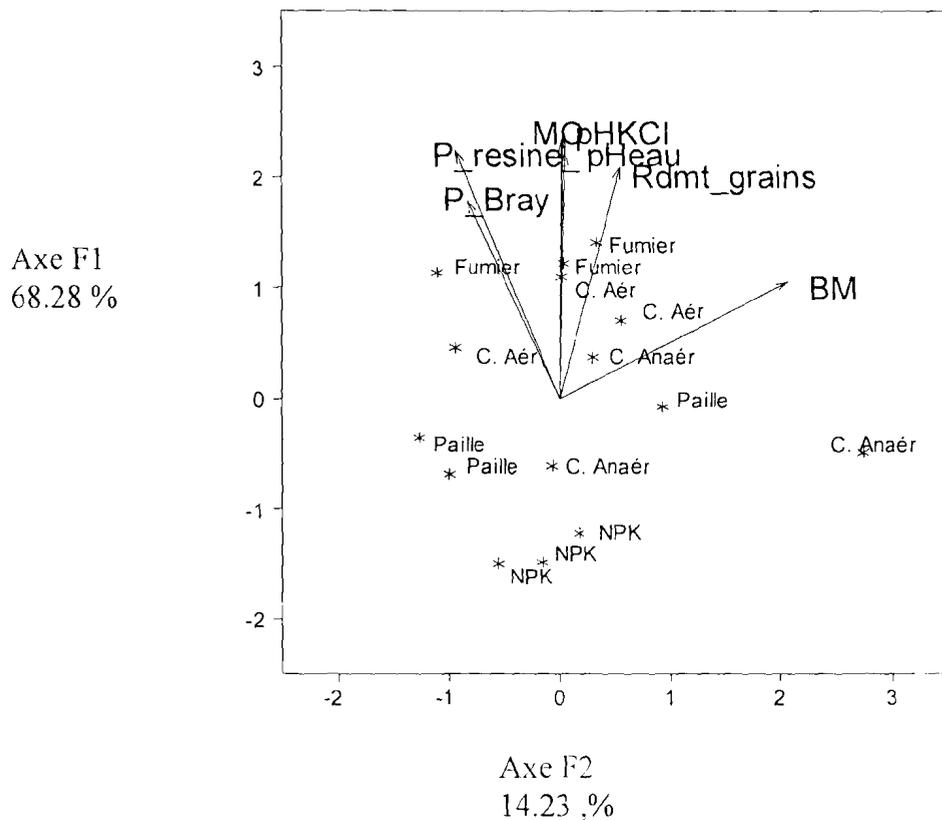


Figure X : Analyse en composante principale entre les propriétés chimiques, biologiques du sol et les rendements du sorgho

C.Aér : compost aérobie, CAnaér : Compost anaérobie, MO : matière organique, Rdmt : Rendements, BM : Biomasse microbienne

3.5.2 Discussion

L'analyse à la composante principale montre que les teneurs en matière organique et le pH du sol déterminent les rendements du sorgho. Le rôle des propriétés chimiques sur les rendements agricoles est bien connu. Le pH du sol détermine la disponibilité des éléments nutritifs qui à leurs tours déterminent les rendements agricoles. La matière organique du sol est la principale source de nutriments pour les plantes. Elle contient la quasi-totalité de l'azote et 20 à 80 % du phosphore du sol (Bationo et al, 1998). Le phosphore disponible et la biomasse microbienne sont peu corrélés aux rendements grains du sorgho. Cela s'expliquerai par le fait que le phosphore ne représente pas un facteur limitant dans les sols étudiés. Nos résultats ont en effet montré dans ces sols, des teneurs en phosphore disponible supérieures aux besoins de la plante.

L'analyse à la composante principale vient appuyer nos résultats sur le rôle des amendements organiques à améliorer la fertilité des sols, et aussi sur les relations qui lient la qualité chimique des substrats et leurs rôle à améliorer les propriétés du sol et les rendements. L'apport du fumier et des composts a un effet plus bénéfique dans l'amélioration des propriétés chimiques, biologiques et des rendements que les apports de résidus de culture bruts et la fumure minérale exclusive. Pieri (1989) a souligné que la fumure minérale exclusive conduisait à l'acidification du sol et à la baisse des rendements. Pour les sols ferrugineux tropicaux ayant une faible teneur en matière organique, les apports d'amendements organiques sont nécessaires pour maintenir la teneur en carbone des sols et la production agricole à un niveau acceptable (Sedogo, 1993).

3.5.3 Conclusion

Les apports organiques améliorent les propriétés chimiques, biologiques et les rendements agricoles. Cette amélioration semble être liée à la qualité chimique des substrats organiques. Les amendements organiques bien décomposés tels que le fumier et les composts sont donc nécessaires à la gestion durable des sols cultivés.

Conclusion générale

La production agricole en Afrique subsaharienne est limitée par la faible disponibilité en phosphore de ses sols. Une bonne activité biologique du sol permet d'améliorer la disponibilité en éléments nutritifs du sol.

Notre étude a permis d'évaluer l'effet à long terme de quatre types de substrats organiques sur le pH la teneur en matière organique du sol, sur l'activité biologique et la disponibilité en phosphore du sol et sur les rendements agricoles.

La fumure organique sous forme de paille, de fumier et de compost aérobie et anaérobie permet d'améliorer à long terme le pH du sol. Elle permet de maintenir, ou d'améliorer à long terme le statut organique des sols comparativement à la fumure minérale exclusive qui entraîne une baisse de cette teneur. L'amélioration de la teneur en matière organique est d'autant plus élevée que le type de substrats apporté est plus décomposé.

Les composts et le fumier s'avèrent être des sources de matières organiques pouvant être utilisées pour améliorer la qualité biologique des sols. Ajouté à la fumure minérale, ils améliorent la biomasse microbienne du sol de 49 à 94 %. La paille de sorgho quand à elle n'améliore pas la biomasse microbienne du sol.

L'apport des substrats organiques tels que le fumier et les composts améliore la disponibilité du phosphore des sols. L'apport de 10 t/ ha/ an de ces substrats accroît la teneur en phosphore Bray I du sol de 19 % à 27 %. Ils améliorent la teneur en phosphore résine et le phosphore microbien durant le cycle de la culture.

L'apport de ces substrats est une solution à long terme pour améliorer la disponibilité en phosphore des sols. La paille de sorgho quant à elle n'améliore pas le phosphore disponible du sol.

L'apport d'amendements organiques dans les sols permet leur gestion durable car ils accroissent à long terme les rendements agricoles et améliorent les propriétés du sol. Toutefois ces amendements doivent être de bonne qualité. Les composts et le fumier de bovin jouent bien ce rôle sécurisant. La paille de sorgho quant à elle peut dans certains cas ne pas améliorer la productivité des sols agricoles.

Perspectives

Le fumier et les composts permettent d'améliorer à long terme la teneur en matière organique des sols, leurs activités biologiques et leurs disponibilités en phosphore. Cela représente une raison de plus pour :

- promouvoir une agriculture intégrée à l'élevage ;
- promouvoir le compostage des résidus cultureux par la confection de fosses compostières ;

En perspectives pour mieux caractériser l'effet de ces substrats sur l'activité biologique et la disponibilité en phosphore pour une agriculture durable respectueuse de l'environnement il est nécessaire :

- d'étendre cette étude en milieu paysans
- d'évaluer la disponibilité du phosphore à des profondeurs de sol dépassant 0-10 cm ;
- d'évaluer l'impact de ces substrats, sur le coefficient d'utilisation des engrais minéraux phosphatés.

Références bibliographiques

AFNOR. (1981). Détermination du pH. (Association Française de Normalisation) NF ISO 103 90. In AFNOR qualité des sols, Paris, 339-348.

Bachelier G. (1973). Activité biologique des sols et techniques simples qui en permettent l'évaluation. Cah. ORSTOM, Série Pédol, Vol XI, No 1. P 65-77

Bationo A., Lompo F., Koala S. (1998). Research on nutrients flows and balances in West Africa: Agriculture, Ecosystems and Environment. 71. P 19-35.

Bonzi M. (1989). Etudes des techniques de compostage et évaluation de la qualité des composts: Effets des matières organiques sur les cultures et la fertilité des sols. Mémoire de fin d'étude IDR. 66p.

Bray R. II. and Kurtz L. T. (1945). Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. Soil Science, 59. P 39-45.

Brink M., Belay G. (2006). Céréales et légumes secs. Ressources végétales de l'Afrique tropicale. Volume 1. 327 P.

Buerkert A., Haake C., Ruckwied M., Marschner H. (1998). Phosphorus application affects the nutritional quality of millet grain in Sahel. Field Crops Research 57. P 223-235

Buerkert A., Bationo A., Piepho II-P. (2001). Efficient phosphorus application strategies for increased crop production in sub-saharan west africa. Field Crops Research, 72. P 1-15.

Burgos-Léon W., Ganry F., Nicou R., Chopart J. L. et Dommergues Y. (1980). Etudes et travaux. Un cas de fatigue de sol induite par la culture de sorgho. Agronomie Tropicale XXXV-4. P 319-334.

Calvet. (2003). Le sol : Propriétés et fonctions. Frances Agricole Editions. 512 P

Chaussod R., Nicolardot B. et Catroux G. (1986). Mesure en routine de la biomasse microbienne des sols par la méthode de fumigation au chloroforme. *Sci. Sol*, 2. P 201-211.

Compaoré E., Fardeau J.C., Morel J. L., Sedogo M. P. (2001). Le phosphore biodisponible des sols : Une des clé de l'agriculture durable en Afrique de l'Ouest. *Cahiers Agricultures*, 10. Numéro (2). P 81-5.

Compaoré E., Frossard E., Sinaj S., Fardeau J-C. and Morel J-L. (2003). Influence of land use management on soil isotopically exchangeable phosphate in soils from Burkina Faso. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 34:1. P 201-223.

Davet P. (1996). Vie microbienne du sol et production Végétale. Editions Quae. 383 P.

Damodar D. R., Subba A. R., and Muneshwar S., (2005). Changes in P fractions and sorption in an alfisol following crop residues application. *J. Plant Nutr. Soil sci.* 168, P 241-247.

Dilly O. (2004). Effects of glucose, cellulose and acid humic on soil microbial eco-physiology. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167. P 261- 266.

Dubus I. (1997). La rétention du phosphore dans les sols : Principe d'étude, modélisation, mécanismes et compartiments impliqués. ORSTOM Nouméa, Doc. Sci. , Tech. III.3, 76 P.

Doré T., Sène M., Pellissier F., Gallet C. (2004). Approche agronomique de l'allélopathie. *Cahiers Agriculture*, 13, Numéro 3

Fardoux J., Fernades P., Niane-Badiane A. et Chotte J. L. (2000). Effet du séchage d'échantillons d'un sol ferrugineux tropical sur la détermination de la biomasse microbienne. Comparaison de deux méthodes biocidales de référence. *Etude de gestion des sols.* P 385-394.

Feller C., Bernhardt-Reversat F., Garcia J. L., Pantier J. J., Roussos S., et Van Viliet-Lanoe B. (1983). Etude de la matière organique de différentes fractions granulométriques d'un sol sableux tropical. Effet d'un amendement organique (compost). *Cah. O.R.S.T.O. M., Ser. Pédol., Vol. XX, No 3.* P 223-238.

Frossard E., Brossard M., Feller C et Rouiller G. (1992). Pouvoir fixateur vis-à-vis des ions phosphates des sols tropicaux à argile 1 :1. *Can. J. Soil Sci.* 72. P 135-143.

Frossard E., Julien P., Neyroud J. A et Sina S. (2004). Le phosphore dans les sols. Etat de situation en Suisse. Cahier de l'environnement no 368. Office Federal de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (OFEFP). Berne, Suisse. 180 P.

Gnankambary Z., Ilstedt U., Nyberg G., Hien V., Malmer A. (2008). Nitrogen and phosphorus limitation of soil microbial respiration and phosphorus limitation of soil microbial respiration in two tropical agro forestry parklands in the south Sudanese zone of Burkina Faso: The effects of tree canopy and fertilisation. *Soil Bio. Biochem.* 40. P 350-359.

Hafner H., George E., Bationo A. and Marshner II. (1993). Effect of crop residues on root growth and phosphorus acquisition of pearl millet in an acid sandy soil in Niger. *Plant and Soil*, 150. P 117-127.

Jenkinson D.S. and Powelson D.S. (1976). The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. A method for measuring soil biomass. *Soil Biol. Biochem.*, 8. P 208-213.

Kaur K., Kapoor K. K. And Gupta A.P. (2005). Impact of organic manures with and without mineral fertilizers on soil chemical and biological properties under tropical conditions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168. P 117-122.

Kouno K., Tuchiya Y. and Ando T. (1995). Measurement of soil microbial biomass phosphorus by anion exchange membrane method. *Soil Bio.Biochem.* 27, P 1353-1357.

Li J., Zhao B-Q., LI X-Y, Jiang R-B and SO H. B. (2008). Effects of long term combined application of organic and mineral fertilizers on microbial biomass, soil enzyme activities and soil fertility. *Agricultural Sciences in China*, 7 (3). P 336-343.

Li Q., Allen H. L., Wollum II A. G. (2004). Microbial biomass and bacterial functional diversity in forest soils : effects of organic matter removal, compaction and vegetation control. *Soil Biol. Biochem.*, 36. P 571-579.

Lompo F. (2009). Effets induits des modes de gestion de la fertilité sur les états du phosphore et solubilisation des phosphates naturels dans deux sols acides du Burkina. Thèse de doctorat en sciences naturelles. Université de Cocody. Abidjan, Côte d'Ivoire. 219 P + annexes.

Mabuhay J. A., Nakagoshi N., and Isagi Y. (2004). Influence of erosion on soil microbial biomass, abundance and community diversity. *Land Degrad. Develop.* 15. P 183-195

Mabuhay J. A., Nakagoshi N., and Isagi Y. (2006). Microbial responses to organic and inorganic amendments in eroded soil. *Land Degrad. Develop.* 17. P 321-332.

Marschner H. (1995). Mineral Nutrition of higher plants. Academic Press, London. 889 P.

Marschner P., Solaiman Z., Rengel Z. (2005). Growth, phosphorus uptake and rhizosphere microbial community composition of a phosphorus efficient wheat cultivar in soils differing pH. *J. Plant Nutr. Soil sci.* 168, P 343-351

Maurer-Troxler C., Chevet A., Ramseier L., Sturny W.G., Oberholzer H-R. (2006). Biologie du sol après 10 ans de semis direct et de labour. *Revue Suisse Agric.*, 38 (2). P 89-94

Mémento de l'agronome. (1991). Ministère de la Coopération et du Développement. 4^e édition. 1635 P.

Mémento de l'agronome. (2002). Cirad- Gret. Ministère des affaires étrangères. 1691 P.

Nacro H.B. (1997). Hétérogénéité de la matière organique dans un sol de savane humide (Lanto, Côte d'Ivoire) : caractérisation chimique et étude in vitro des activités microbiennes de minéralisation du carbone et de l'azote. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie. Paris III. 302 P.

Naramabuye F. X. and Haynes R. J. (2007). The liming effect of five organic manures when incubated with an acid soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 170. P 615-622.

Oberson A. and Joner E. J. (2005). Microbial turnover of phosphorus in soil. In Turner B. L. et al. eds. *Organic phosphorus in the environment*. CAB International, Wallingford, Oxon, UK. P 133-164.

Oberson A., Bünemann E.K., Friesen D.K., Rao I.M., Smithson P.C., Turner B.L. and Frossard E. (2006). Improving phosphorus fertility in tropical soils through biological interventions. In Uphoff N. et al. eds. *Biological approaches to sustainable soil systems*. CRC Press, Boca Raton FL. p 531-546.

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 en sciences naturelles. Université Polytechnique de Bobo Dioulasso, Institut du Développement Rural. 186 P

Pallo F. J. P. et Thiombiano L. (1989). Sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétion du Burkina Faso: Caractéristiques et contraintes pour l'utilisation agricole. *Bunasol. Soltrop* 89. P 307-327.

Pallo F. J. P., Sawadogo N., Sawadogo L., Sedogo P. M. et Assa A. (2008). Statut de la matière organique des sols dans la zone sud-soudanienne au Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 12 (3). P 291-301

Pieri C. (1989). Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au Sahara. MCD/CIRAD. 444p.

Pieri C. (1991). Bilan du phosphore et agriculture durable en Afrique. In: Tiessen H., Frossard E. eds. *Phosphorus Cycles in terrestrial and aquatic ecosystems Regional workshop 4: Africa SCOPE/UNEP*. March 18-22. Nairobi, Kenya (Africa), 1991. P 44-72.

Saffigna P.G., Powlson D. S., Brookes P. C. and Thomas G. A. (1989). Influence of sorghum residus and tillage on soil organic matter and soil microbial biomass in an Australian vertisol. *Soil Biol. Biochem.* Vol 21, No 6. P 759-765.

Samahadthai P., Vityakon P. and Saenjan P. (2010). Effects of different quality plant residues on soil carbon accumulation and aggregate formation in a tropical sandy soil in Northeast Thailand as revealed by a 10 year field experiment. *Land Degrad. Develop.*

Schvartz C., Decroux J. et Muller J-C. (2005). Guide de la fertilisation raisonnée : grandes cultures et prairies. France Agricole Editions. 414 P.

Sedogo M.P. (1981). Contribution à la valorisation des résidus culturaux en sol ferrugineux et sous climat tropical semi-aride (Matière organique du sol et nutrition azotée des cultures). Thèse de Docteur Ingénieur INPL- ENSAIA Nancy, France, 195 p.

Sedogo M.P. (1993). Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture : incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse de Doct. D'Etat, FAST, Université Nationale de Côte d'Ivoire, 285 p.

Sylvia D. M., Hartel P. G., Fuhrmann J. J. and Zuberer D. A. (2005). Principles and Applications of Soil Microbiology. 2nd edition. Pearson. 640 P.

Waldrop M. P. and Harden J.W. (2008). Interactif effects of wildfire and permafrost on microbial communities and soil processes in an Alaskan black spruce forest. *Global Change Biology*. 14. P 2591-2602.

Walkley A. and Black J.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromatic acid titration method. *Soil Science* 37, 29-38.

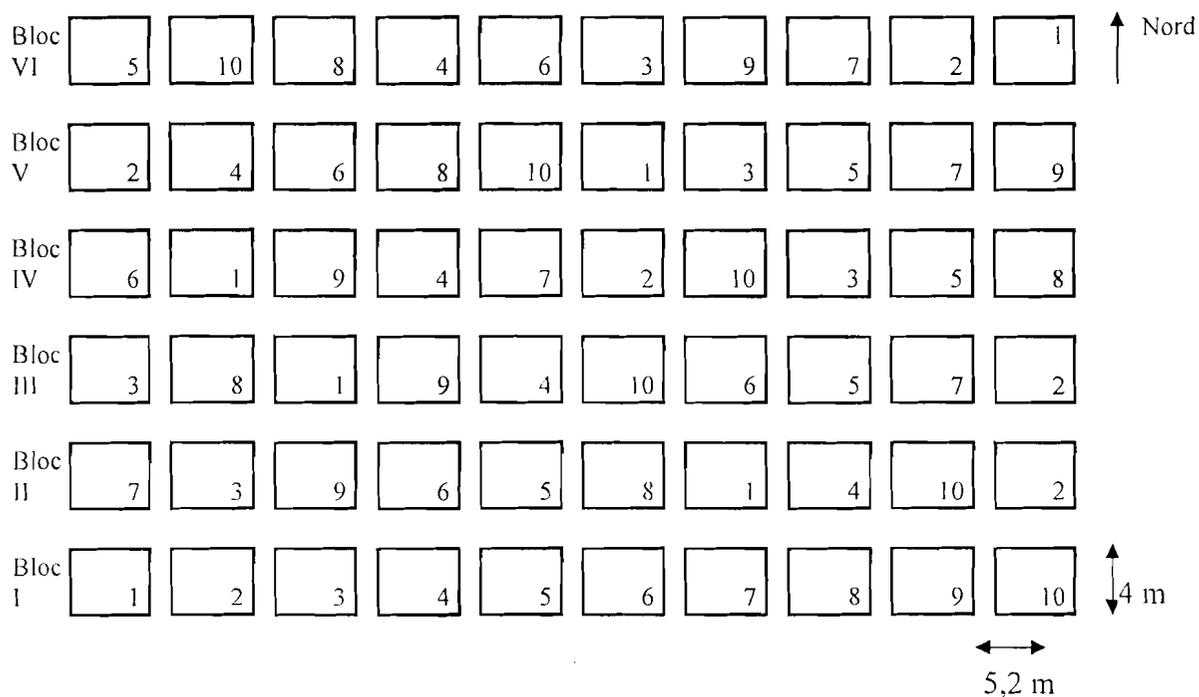
Wan J. H. C., and Wong. M. H. (2004). Effects of earthworm activity and solubilizing bacteria on P availability in soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*,167. P 209-213.

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

Zougmoré R. B. (2003). Integrated water and nutrient management for sorghum production in semi-arid Burkina Faso. Thèse de PhD, Wageningen University.

Annexes

Annexe 1 : Schéma du dispositif au champ



1 : PK ; 2 : NPK ; 3 : Paille+PK ; 4 : Paille+NPK ; 5 : Fumier+PK ; 6 : Fumier+NPK ; 7 : Compost aérobie +PK ;
 8 : Compost aérobie +NPK ; 9 : Compost anaérobie +PK ; 10 : Compost anaérobie +NPK

Annexe 2 : Analyses de variances des données obtenues sur le phosphore résine du sol en mg/kg au cours de la culture

Traitements	50 JAS	70 JAS	80 JAS	120 JAS
NPK	17,2	11,1 b	12,4 b	14,4 b
Paille + NPK	15,2	13,5 b	14,2 b	14,4 b
Fumier + NPK	19,1	21,0 a	22,8 a	23,1 a
C.Aér + NPK	15,5	17,0 ab	16,5 b	18,3 ab
C.Anaér + NPK	14,0	15,5 ab	14,9 b	15,3 b
Probabilité P	0,67	0,01	0,001	0,008
Signification	NS	S	HS	HS

Les traitements accompagnés d'une même lettre ne sont significativement différents au seuil de 5 %.

C.Aér : compost aérobie, CAnaér : Compost anaérobie

NS : non significatif, S : significatif, HS : hautement significatif

Annexes 3 : Analyses de variances des données obtenues sur le phosphore microbien du sol en mg/kg au cours de la culture

Traitements	50 JAS	70 JAS	80 JAS	120 JAS
NPK	0,2 b	0,2 b	0,3 b	0,6 b
Paille + NPK	0,3 b	1,5 ab	3,8 a	1,0 b
Fumier + NPK	7,6 a	1,6 ab	0,9 b	0,5 b
C.Aér + NPK	1,5 b	3,2 a	1,6 b	1,6 ab
C.Anaér + NPK	1,5 b	3,3 a	1,4 b	2,3 a
Probabilité P	0,0001	0,02	0,003	0,007
Signification	HS	S	HS	HS

S : significatif, HS : hautement significatif

Les traitements accompagnés d'une même lettre ne sont significativement différents au seuil de 5 %.

C.Aér : compost aérobie, CAnaér : Compost anaérobie