

UNIVERSITE POLYTECHNIQUE DE  
BOBO-DIOULASSO  
(U.P.B)

-----  
Institut du Développement Rural  
(I.D.R)

CENTRE NATIONAL DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET  
TECHNOLOGIQUE  
(C.N.R.S.T)

-----  
Institut de l'Environnement et de  
Recherches Agricoles  
(I.N.E.R.A)

## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur du  
Développement Rural

Option : Agronomie

Thème :  
Influence des modes de gestion de la fertilité sur le statut du  
phosphore d'un sol ferrugineux tropical

Directeur de Mémoire  
Dr. ZOMBRE N. Prosper  
Maître Assistant

Maître de Stage  
Dr. LOMPO François  
Chargé de Recherches

SAWADOGO Oumarou

Juin 2002

## TABLE DES MATIERES

DEDICACE

AVANT PROPOS

RESUME

SIGLES ET ABREVIATIONS

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b>CHAPITRE 1 : Généralités sur le phosphore</b> .....	4
<b>1.1.La problématique du phosphore des sols ferrugineux tropicaux</b> .....	4
<b>1.2.Les rôles et les fonctions du phosphore</b> .....	5
1.2.1.Le phosphore et la croissance et le développement des plantes.....	5
1.2.2.Le phosphore dans l'amélioration et le maintien de la fertilité du sol.....	5
1.2.3.Le phosphore et l'amélioration de la production animale.....	6
1.2.4.Le phosphore sur l'environnement.....	6
<b>1.3.Le cycle et la dynamique du phosphore</b> .....	7
<b>1.4.Les méthodes d'extraction du phosphore assimilable ou biodisponible</b> .....	8
1.4.1.La méthode Bray I.....	8
1.4.2.La méthode Olsen.....	8
1.4.3.La méthode Olsen-Dabin ou Olsen modifiée.....	9
1.4.4.La méthode MehlichIII.....	9
1.4.5. Autres méthodes d'extraction.....	9
<b>CHAPITRE 2 : Le milieu d'étude</b> .....	10
<b>2.1.La situation géographique</b> .....	10
<b>2.2.Le climat</b> .....	10
<b>2.3.La végétation</b> .....	12
<b>2.4.La géologie et la géomorphologie</b> .....	12
<b>2.5.Les unités pédologiques</b> .....	12
<b>CHAPITRE 3 : Le matériel et les méthodes d'étude</b> .....	14
<b>3.1.Les méthodes d'étude</b> .....	14
<b>3.1.1.Le dispositif d'étude : l'essai entretien de la fertilité de Saria</b> .....	14
3.1.1.1.L'historique de l'essai.....	14
3.1.1.2.Le dispositif expérimental.....	15
3.1.1.3.Les variétés utilisées dans l'essai entretien de la fertilité.....	17
3.1.1.4.L'estimation des apports en phosphore et en NK des racines.....	17
<b>3.1.2.Les expérimentations en vases de végétation</b> .....	18
3.1.2.1.Les objectifs.....	18
3.1.2.2.Le protocole expérimental.....	18
3.1.2.3.Les analyses statistiques.....	19
<b>3.2.Le matériel d'étude</b> .....	20
3.2.1.Les sols.....	20
3.2.2.Les sources de phosphore.....	20
3.2.3.Le matériel végétal.....	20

<b>3.3.Les méthodes d'analyses chimiques.....</b>	<b>21</b>
3.3.1.La mesure de pH.....	21
3.3.2.Le dosage de l'azote total.....	21
3.3.3.Le dosage du phosphore total.....	21
3.3.4.Le dosage du potassium.....	21
3.3.4.Le fractionnement du phosphore.....	21
3.3.5.Le dosage du complexe d'échange.....	22
3.3.7.Le dosage du phosphore assimilable.....	22
3.3.8.Le dosage de la matière organique des sols.....	22
<b>CHAPITRE 4 :Les résultats et les discussions.....</b>	<b>23</b>
<b>4.1.Les effets des modes de gestion de la fertilité des sols sur les rendements.....</b>	<b>23</b>
4.1.1.Evolution annuelle des rendements de la série a.....	23
4.1.2.Evolution annuelle des rendements de la série c.....	24
4.1.3.Evolution des tendances dans les 2 séries.....	24
4.1.4.Discussions-conclusion.....	29
<b>4.2.Effets des modes de gestion de la fertilité des sols sur les bilans minéraux théoriques.....</b>	<b>31</b>
4.2.1.Les données de base.....	31
4.2.2.Les bilans minéraux théoriques.....	33
4.2.2.1.Le bilan théorique du phosphore dans la série a.....	33
4.2.2.2.Le bilan théorique de N et K dans la série a.....	33
4.2.2.3.Le bilan théorique du phosphore dans la série c.....	33
4.2.2.4.Le bilan théorique de N et K dans la série c.....	33
<b>4.3.Effets des modes de gestion de la fertilité sur les caractéristiques physico-chimiques des sols.....</b>	<b>36</b>
4.3.1.Effets sur la matière organique.....	36
4.3.2.Effets sur la somme des bases échangeables.....	36
4.3.3.Effets sur la CEC.....	36
4.3.4.Effets sur le pH.....	37
4.3.5.Effets sur l'aluminium échangeable.....	37
4.3.6.Effets sur le phosphore assimilable.....	37
4.3.7.Effets sur la granulométrie.....	38
4.3.8.Discussions-conclusion.....	41
<b>4.4.Effets des modes de gestion de la fertilité sur les formes du phosphore des sols.....</b>	<b>43</b>
4.4.1.Les résultats.....	43
4.4.2.Discussions-conclusion.....	45
<b>4.5.Résultats des expérimentations en vases de végétation.....</b>	<b>46</b>
4.5.1.La détermination de l'espèce végétale pour l'essai vase.....	46
4.5.2.Effets des sources et de dose de phosphore sur la production de matière sèche et de phosphore exporté.....	50
4.5.2.1.Effets sur la production de matière sèche.....	50
4.5.2.2.Effets sur le phosphore exporté.....	54
4.5.2.3.Efficacité relative du phosphate naturel.....	57
4.5.2.4.Discussions-conclusion.....	59
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>61</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>63</b>
<b>ANNEXES.</b>	

A la mémoire de mon père SAVADOGO RASMANE

Décédé le 14 Janvier 2002, pendant mon stage.

**A MES PARENTS, A MES FRERES, A TOUS CEUX QUI M'ONT APORTE LEUR  
SOUTIEN MORAL ET MATERIEL PENDANT CES MOMENTS DIFFICILES.**

## AVANT PROPOS

Au cours de ces 10 mois de stage effectué sur les Stations de Recherche de Saria et de Kamboinsé, nous avons bénéficié de la collaboration et des expériences de

Nombreuses personnes ; ainsi, nous tenons à remercier :

-Dr SEDOGO M.P., Délégué Général du CNRST , qui nous a accepté dans son service. Il a participé à la finition du Mémoire en apportant sa contribution à la correction et à la mise en forme de ce document ;

-Dr LOMPO F. , Directeur Adjoint chargé des Programmes à l'INERA , notre Maître de Stage, qui nous a assuré un encadrement technique et scientifique efficace malgré ses lourdes fonctions administratives et de recherches ;il a su par ses hautes qualités humaines et son amour pour le travail, nous guider vers la Recherche Agronomique ;

-Dr ZOMBRE P.N. , notre Directeur de Mémoire pour son concours appréciable à ce travail ;

-Dr OUEDRAOGO L.R. et Dr OUATTARA B. respectivement Chef de CREAM de Kamboinsé et Délégué Régional du CRREA du centre pour nous avoir accepté dans leurs structures .

-Dr TAONDA J. B. ,Chef de Programme GRN/SP - Saria pour son concours multiforme à ce travail ;

-Mr GNANKAMBARY Z. , Responsable du Laboratoire d'analyses des Sols, des Eaux et des Plantes de Kamboinsé. qui a su par son contact facile, nous accorder toutes facilités pour travaux d'analyses ;

-Mr OUATTARA K., pour son appui aux analyses statistiques et à la mise en forme du document.

Nous tenons tout particulièrement à faire une mention spéciale à l'attention des Techniciens :

RAMDE M., KABORE J.P., OUANDAOGO N., SANOU M., COULIBALY D., pour leur contribution à l'exécution des tâches quotidiennes.

Que tous ceux dont les noms n'ont pu être cités trouvent sur cette page l'expression de notre profonde reconnaissance pour leurs contributions à ce travail.

## RESUME

Les sols cultivés du Burkina-Faso sont constitués en majorité de sols ferrugineux tropicaux souvent lessivés qui sont caractérisés par leur carence quasi générale en phosphore. L'utilisation des fumures notamment organo-minérale faible, minérale faible et minérale forte exclusivement, associées à des rotations culturales, sur le statut du phosphore, est abordée dans cette étude.

Des analyses de l'évolution des rendements et des caractéristiques physico-chimiques de sols, l'établissement de bilans minéraux théoriques, le fractionnement du phosphore et des essais en vases de végétation, ont permis d'aboutir au type de fumure susceptible d'améliorer la teneur des sols en phosphore et la production agricole.

Ainsi, la fumure organo-minérale faible (fmo), améliore-t-elle les caractéristiques physico-chimiques des sols et particulièrement la teneur des sols en phosphore assimilable.

L'association de cette fumure organo-minérale avec le Burkina Phosphate assure une bonne nutrition phosphatée des cultures.

Les fumures minérale faible et minérale forte exclusivement favorisent l'acidification des sols et entraînent donc la baisse des rendements.

La rotation sorgho/légumineuses favorise la solubilisation des formes de phosphore liées, grâce à l'acidité induite des légumineuses.

Mots clés : Phosphore, fumure organo-minérale faible, fumure minérale faible, fumure minérale forte, Burkina Phosphate, sols ferrugineux tropicaux lessivés, sorgho, niébé.

## SIGLES ET ABREVIATIONS

BP : Burkina-phosphates.

BUNASOLS : bureau national des sols

CEC: capacité d'échange cationique.

CIRAD: Centre de coopération international en recherches agronomiques pour le développement.

EEF : essai entretien de la fertilité.

Fm : fumure minérale faible.

FM : fumure minérale forte.

Fmo : fumure organo-minérale faible.

ICRAF : Centre international pour la recherche en Agro-Forestérie.

IFDC : International Fertilizer Development Center.

INERA : institut de l'environnement et de recherches agricoles.

IRAT : institut de la recherche en agronomie tropicale.

IVRAZ : institut voltaïque de recherches agronomiques et zootechniques.

M.S. : matière sèche.

PIB : produit intérieur brut.

PN: phosphates naturels.

SBE : somme des bases échangeables.

SOFITEX : société des fibres et textiles du Burkina.

TSP : super triple phosphate.

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques des sols de Saria.

Tableau 2 : Quelques normes pour l'établissement des bilans minéraux théoriques.

Tableau 3 : Mobilisations et exportations des éléments minéraux par quelques cultures.

Tableau 4 : Apports en éléments NPK des racines.

Tableau 5 : Bilan théorique de l'azote de la série a.

Tableau 6 : Bilan théorique du phosphore de la série a

Tableau 7 : Bilan théorique du potassium de la série a.

Tableau 8 : Bilan théorique du phosphore de la série c.

Tableau 9 : Bilan théorique de l'azote de la série c.

Tableau 10 : Bilan théorique du potassium de la série c.

Tableau 11 : Caractéristiques chimiques de l'EEF/Saria.

Tableau 12 : Caractéristiques granulométriques de l'EEF/Saria.

Tableau 13 : Les quatre fractions de phosphore dans les traitements.

Tableau 14 : Production de matière sèche (en g).

Tableau 15 : Exportation du phosphore par le sorgho (en mg/vase).

Tableau 16 : Efficacité relative des phosphates naturels.

## LISTE DES GRAPHIQUES

- Graphique 1 : pluviométrie et nombre de jours de pluies de 1982-2001.
- Graphique 2 : Evolution mensuelle de la pluviométrie de Saria en 2001.
- Graphique 3 : Evolution des rendements des grains de sorgho de la série a (1960-2001).
- Graphique IV : Evolution des rendements en grains de sorgho de la série c (1960-2000).
- Graphique V : Evolution des rendements de niébé de la série c (197-2001).
- Graphique VI : Evolution des tendances des rendements de sorgho de la série a (1960-2001).
- Graphique VII : Evolution des tendances des rendements de sorgho de la série (1960-2000).
- Graphique VIII : Evolution des tendances de rendements de niébé de la série c (1973-2001).
- Graphique IX : Apport en NPK des racines.
- Graphiques X : Les formes de phosphore par traitement
- Graphique XI : Evolution de la matière sèche produite par le sorgho fourrager.
- Graphique XII : Evolution de la matière sèche produite par le fonio.
- Graphique XIII : Evolution de la matière sèche produite par le mil.
- Graphique XIV : Cumul de la matière sèche des trois cultures.
- Graphique XV : Production de matière sèche à la première coupe.
- Graphique XVI : Production de matière sèche à la deuxième coupe.
- Graphique XVII : matière sèche souterraine.
- Graphique XVIII : Production cumulée de matière sèche (aérienne et souterraine).
- Graphique XIX : Phosphore exporté à la 1<sup>ère</sup> coupe.
- Graphique XX : Phosphore exporté à la 2<sup>ème</sup> coupe.
- Graphique XXI : Phosphore exporté par les racines.
- Graphique XXII : Phosphore total exporté.

## INTRODUCTION

Le taux de croissance de la population dans les pays sahéliens d'Afrique était de 3.1% en 1993, taux le plus élevé dans le monde (Banque Mondiale, IFDC, ICRAF, 1994) .

Concomitamment à cette croissance démographique persistent une baisse de la production agricole, une migration et un exode rural des populations. En milieu rural, on assiste à une réduction des terres cultivables, à un faible accès aux intrants et à une inadaptation des systèmes de culture.

Selon RUSSEL (1982), les contraintes majeures à la production agricole en Afrique sahélienne sont essentiellement :

- l'insuffisance de l'alimentation hydrique des cultures ;
- la faible teneur des sols en azote et en phosphore ;
- la pression foncière réduisant les superficies emblavées et les temps de jachère ;
- l'acidification des sols.

En effet dans cette zone agro-écologique, les éléments nutritifs du sol ont été lessivés et perdus par les exportations lors des récoltes, de l'érosion et du ruissellement ; ces pertes n'ont pas été compensées ni par la restitution par les résidus de récoltes, ni par des apports en fumure minérale et organique à cause de la limitation des ressources financières.

Au Burkina-Faso plus particulièrement, l'agriculture occupe 85% de la population et contribue pour 45% au PIB, et 80% des exportations totales du pays. Ce secteur d'activité évolue dans un environnement socio-économique défavorable et dans un milieu physique contraignant (LOMPO et al., 1994). Dans les régions très peuplées, aux sols épuisés, qui occupent le centre du pays, les sols manifestent une carence quasi générale en phosphore.

Une étude réalisée par MEMON et FOX (1983), cités par COMPAORE (1996), montre que dans certains sols, la concentration en ions phosphates dans la solution du sol est inférieure à la valeur de 0.02mg de P/l, considérée comme valeur seuil pour assurer une alimentation satisfaisante des cultures. Des expérimentations multilcales concernant l'application d'engrais minéraux sur les cultures vivrières réalisées par DUMONT et DUPONT de DINECHIN (1967), ont confirmé que la carence en phosphore est le premier facteur limitant dans la plupart des sols du Burkina-Faso. Pour venir à bout de ces contraintes, l'utilisation directe des phosphates naturels ou partiellement acidulés, l'adjonction des phosphates naturels au soufre minéral ou au cours du compostage, ont montré de meilleurs résultats sur l'amélioration de la teneur du sol en phosphore assimilable (BAZIE, 1984 ;

BADO,1989 ; AUL,1988 ;TRUONG,1989 ; LOMPO,1989 ; LOMPO,1993 ; LOMPO et al.,1994). Le projet phosphate et l'IVRAZ/IRAT, à l'issue d'expérimentations réparties dans l'ensemble du pays, sont parvenus en 1983, à des recommandations générales sur l'utilisation des phosphates naturels : apport de 400kg/ha de PN en première année pour toute culture , suivie d'une fumure annuelle d'entretien dont la dose est liée au type de spéculatation (200kg/ha pour le sorgho et le mil, 250kg/ha pour l'arachide et 300kg/ha pour le maïs). En 1992, HIEN et al., in LOMPO (1993), dans le cadre du projet Engrais Vivriers ont défini des formules de fumures économiquement rentables pour les cultures céréalières en fonction des zones agro-écologiques du pays et en utilisant des ressources locales.

Ces différents résultats de recherches avaient pour point focal l'utilisation des phosphates naturels en vue de corriger la déficience en phosphore des sols ; cependant les effets des méthodes de fertilisation minérale (engrais), organo-minérale (engrais+fumier) et des rotations culturales sur le statut phosphaté des sols, ne sont pas complètement connus.

L'objectif global de cette étude dont le sujet est : « **l'influence des modes de gestion de la fertilité sur le statut du phosphore d'un sol ferrugineux tropical** », est de contribuer à l'amélioration de la teneur des sols en phosphore par la connaissance de méthodes adéquates de fertilisation minérale et organo-minérale, combinées à des rotations culturales adaptées.

Les objectifs spécifiques essentiels poursuivis par l'étude sont :

- faire la synthèse partielle et l'analyse de la production de l'essai entretien de Saria ;
- dresser un bilan théorique du phosphore des sols de quelques traitements de l'essai ;
- connaître l'influence des modes de gestion sur les fractions du phosphore du sol.
- évaluer la réponse des sols provenant de différents modes de gestion de la fertilité, à des apports de phosphates naturels.

Deux hypothèses principales sous-tendent notre travail :

- Les fumures minérale et organo-minérale contribuent à l'amélioration de la fertilité phosphorique des sols tropicaux, selon leur nature et leur dose ;
- La fertilité phosphorique des sols étant gouvernée par des facteurs physico-chimiques des sols, le type de rotation culturale qui influence la biomasse racinaire a un effet sur la dynamique du phosphore des sols.

Notre travail qui s'intègre dans un vaste programme de recherches de l'INERA sur le phosphore, comprend quatre chapitres : les trois premiers chapitres qui situent le contexte de l'étude et de la méthodologie , traitent respectivement de la revue bibliographique sur le phosphore, de la présentation du milieu physique de l'étude et les matériels et les méthodes d'étude.

Le quatrième chapitre intitulé « Résultats et Discussion » traite successivement des résultats antérieures des rendements de l'essai entretien de la fertilité, des bilans minéraux théoriques, des caractéristiques physico-chimiques des sols, du fractionnement du phosphore et enfin des résultats de l'essai en vase de végétation.

Enfin une conclusion générale terminera notre travail.

## **CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE PHOSPHORE.**

### **1.1.La problématique du phosphore des sols ferrugineux tropicaux.**

Selon COMPAORE(1996), lorsque le phosphore du sol qui est prélevé par les plantes (phosphore biodisponible) devient limitant, l'agriculture peut être considérée comme non durable ; donc un système agricole durable veut que le phosphore apporté aux sols maintienne ou accroisse les niveaux de phosphore biodisponible. Le phosphore est donc incontestablement un élément capital pour l'amélioration de la production agricole.

Cependant, les sols tropicaux et particulièrement les sols ferrugineux du Burkina Faso, manifestent une carence générale en phosphore, et 20 à 80 % du phosphore dans les sols peuvent être sous forme de phosphore organique.

SEDOGO (1981) situe les origines de cette carence des sols ferrugineux tropicaux en phosphore dans la nature du substratum géologique et son évolution au cours de la formation du sol, mais aussi dans la faible teneur en matière organique et l'épuisement rapide de ces sols après leur mise en culture.

DOGUI (1986), cité par LOMPO (1993), ajoute que dans les conditions de température élevée et d'alternance humectation-dessiccation, qui caractérisent le climat tropical, la minéralisation de la matière organique est rapide et il en découle un appauvrissement du sol et par la suite une rétrogradation du phosphore apporté par les engrais. En effet, lorsqu'on apporte des engrais phosphatés solubles dans l'eau, une faible partie du phosphore demeure comme ions phosphatés solubles de la solution du sol ; les ions phosphatés sont rapidement adsorbés sur les surfaces des particules du sol et précipités sous forme de phosphates de calcium, de fer et d'aluminium, ou bien convertis sous forme organique (BARBER,1977 ; PIERI,1989 ; FIRDAUS, 2001).

Les sols ferrugineux tropicaux sont aussi bien fournis en hydroxydes de fer et d'aluminium qui ont un pouvoir fixateur du phosphore, supérieur à celui des argiles. Dans les sols acides, cette fixation est fréquente et très énergique et ce processus est extrêmement prononcé dans ces sols qu'il entraîne une alimentation phosphatée des cultures difficile (SOLTNER,1994).

Il est aussi important de souligner que de fortes teneurs en aluminium échangeable (cas fréquents sur sols ferrugineux tropicaux) créent le blocage de nombreuses réactions biochimiques dans les cellules des plantes qui impliquent le transfert des ions phosphates, par

exemple dans le processus d'oxydation (LÜTTGE et CLARKSON,1992 ; cités par FIRDAUS 2001)

## **1.2.Rôles et fonctions du phosphore.**

### **1.2.1. Le phosphore et la croissance et le développement des plantes.**

Le phosphore est le nutriment primaire obligatoire pour la production agricole ; le phosphore assimilable assure la croissance et le développement de la plante, une maturation rapide des cultures et une amélioration de la qualité et de la quantité de la production agricole. Les composés phosphatés sont indispensables pour l'accumulation et la libération de l'énergie nécessaire au métabolisme cellulaire, à la formation de la graine, au développement du système racinaire et à la maturité de la culture (SOLTNER,1994).

Une bonne nutrition phosphatée des cultures réduit le risque d'attaques des ravageurs et des maladies (Banque Mondiale, IFDC, ICRAF,1994).La production agricole dépend donc du phosphore sans lequel les autres éléments nutritifs ont leurs effets limités sur la croissance et le développement de la plante. Ainsi avec une déficience prononcée en phosphore, les légumineuses deviennent incapables de fixer l'azote atmosphérique car cette fixation d'azote par les bactéries symbiotiques exige du phosphore.

### **1.2.2.Le phosphore dans l'amélioration et le maintien de la fertilité du sol.**

Le phosphore a un rôle crucial pour l'amélioration et le maintien de la fertilité des sols à travers les effets suivants :

- l'amélioration des propriétés physiques du sol par la formation d'agrégats et l'augmentation de la capacité de rétention ;
- l'amélioration de la capacité d'échange cationique (CEC) :Des essais de fumures phosphatés au champ et des analyses au laboratoire réalisés par LUTZ J.F. , (1966), ont montré que les charges négatives des sols augmentaient après addition d'engrais phosphatés , entraînant du même coup l'amélioration de la capacité d'échange cationique (CEC) ;

- l'accroissement de la biomasse racinaire :l'application de phosphore favorise le développement des racines et des poils absorbants des cultures et des arbres, contribuant ainsi à améliorer la structure du sol et à accroître la source de matière organique ;
- l'accroissement de la biomasse microbienne qui est un facteur primordial pour la fixation d'azote chez les légumineuses.

### 1.2.3. Le phosphore et l'amélioration de la production animale.

Comme déjà annoncé tantôt, le phosphore en améliorant la fixation de l'azote par les bactéries symbiotiques, favorisent la croissance et le développement des légumineuses , riches en azote et qui constituent des fourrages bien appréciés par les animaux.

Des travaux de R.G. HEMINGWAY (1977) ont montré qu'une alimentation pauvre en phosphore entraîne chez les ruminants des symptômes d'aphosphorose dont les principaux sont :

- une anomalie des os et le rachitisme chez les jeunes agneaux ;
- une insuffisance de l'appétence et de la digestibilité ;
- une absence d'œstrus chez les vaches et les génisses contribuant à décroître le taux de fertilité ;
- une fièvre de lait.

### 1.2.4.Le phosphore sur l'environnement

Les amendements phosphatés sont nécessaires pour obtenir le développement des plantations forestières, surtout chez les conifères , le palmier à huile, le cocotier, l'hévéa, etc.(Banque Mondiale,IFDC,ICRAF,1994). Le phosphore en permettant la croissance et le développement des cultures et des essences ligneuses , permet par l'intermédiaire d'engrais phosphatés de régénérer des terres autrefois incultes et de rétablir la couverture végétale qui amoindrit l'effet érosif du ruissellement et du vent.

Cependant les composés phosphatés disposent aussi d'inconvénients qui méritent d'être connus . En effet, les composés phosphatés comme les phosphates naturels sont révélés contenir une gamme de métaux lourds notamment le Cadmium, le Zinc, le Vanadium, l'Arsenic, le Plomb, le Chrome et des éléments radioactifs comme l'Uranium et le Thorium (SCHRÖEDER ,1963 ; LAUGHIN M.C. ,1996 ; KATALIN D.,2000; DARINKA B.,1998 ; ROTHBAUM H.P.,1979 ; PEZZAROSSO B. ,1993 ; JACKSON et ALLOWAY ,1992 ) .

Des apports excessifs de phosphore aux sols contribuent à l'accumulation de ces éléments dans les sols, mais aussi à leur transfert dans les plantes qui sont la source de l'alimentation humaine. Le Cadmium par exemple n'a aucune fonction essentielle dans la plante et est toxique à de fortes concentrations non seulement pour les plantes mais aussi pour les animaux et l'homme (JACKSON et ALLOWAY, 1992). Les ions  $Cd^{2+}$  libres sont très toxiques et les reins apparaissent comme organes les plus sensibles à ce métal lourd.

Heureusement que les teneurs en ces métaux dans les plantes jusque là sont infimes et ne présentent pas d'inquiétude pour la santé humaine (KATALIN DEBRECZENI, 2000).

### **1.3. Le cycle et la dynamique du phosphore.**

Le phosphore existe dans la nature sous les formes minérales et organiques (SOLTNER, 1994) :

-Le phosphore organique est d'origine végétale, animale ou issu d'engrais organiques ; la décomposition des résidus végétaux, des déjections et des cadavres animaux aboutit à deux possibilités : soit le phosphore organique est minéralisé en ions phosphates dissouts dans la solution du sol et assimilable par les plantes, soit il subit le processus de l'humification pour constituer une réserve en phosphore organique à évolution rapide (humophosphates).

Les ions phosphates dissouts dans la solution du sol peuvent par insolubilisation donner des phosphates précipités ou cristallisés insolubles, ou par la réorganisation, former les humophosphates qui tout comme les ions phosphates de la solution du sol peuvent se fixer sur le complexe argilo-humique et sur les hydroxydes de fer et d'alumine ou même se rétrograder entre les feuillettes d'argiles, devenant donc moins accessibles aux plantes. Il existe un échange constant entre les ions phosphates de la solution du sol et ceux fixés sur le complexe argilo-humique et les hydroxydes de fer et d'alumine.

-Le phosphore minéral provenant essentiellement des engrais minéraux et de l'altération de la roche mère, est soluble dans la solution du sol et assimilable par les plantes. Il peut aussi se précipiter ou se cristalliser également en phosphates insolubles ou encore se fixer sur le complexe argilo-humique et sur les hydroxydes de fer et d'alumine.

Il convient de noter que le phosphore est concentré dans les graines des cultures et est perdu par les exportations. Le phosphore est difficilement entraîné par le lessivage contrairement à l'azote et au potassium. Les pertes sont essentiellement dues à l'érosion et au ruissellement.

#### **1.4. Les méthodes d'extraction du phosphore assimilable ou biodisponible**

L'extraction du phosphore assimilable est délicate ; cette fraction se trouve dans le sol sous forme de phosphate de calcium (mono calcique), de fer et d'alumine. Aucun réactif n'extrait à la fois ces 3 formes (SOLTNER,1994). En effet, il n'existe pas de méthode universelle pour extraire le phosphore assimilable et plusieurs solutions d'extraction ont été expérimentées en rapport avec la nature des sols.

Le dosage colorimétrique du phosphore assimilable est effectué pour toutes les méthodes qui seront décrites , par la coloration au bleu de molybdène au spectrophotomètre d'absorption atomique. Les principales méthodes d'extraction du phosphore assimilable, utilisées sur les sols tropicaux comprennent :

##### **1.4.1. La méthode BRAY1**

Elle a été mise au point en 1945 par BRAY et KURTZ. Le réactif d'extraction est une solution de fluorure d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) 0.03M et l'acide chlorhydrique 0.025M. Le rapport terre/solution est de 1/7 avec un temps d'extraction d'une minute et un pH de la solution étant de 2.9. Cette méthode convient aux sols acides et neutres car elle permet l'extraction du phosphore acido-soluble, c'est à dire le phosphore lié au fer et à l'alumine (BOYER,1982 ; COMPAORE,1996).

##### **1.4.2. La méthode OLSEN**

Elle a été mise au point en 1954 . Cette méthode a un large spectre d'action vis à vis des sols. Le réactif d'extraction est une solution de bicarbonate de sodium ( $\text{NaHCO}_3$ ) 0.5M à pH de 8.5 avec un rapport terre/solution de 1/20. Le principe de cette méthode se base sur le fait que dans les sols, la solution d'extraction abaisse la concentration des ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , et  $\text{Fe}^{3+}$  en les précipitant sous forme de carbonate de calcium, d'hydroxyde de fer et d'aluminium . On observe alors une augmentation de la concentration d'ions phosphates dans la solution.

### 1.4.3. La méthode OLSEN-DABIN ou OLSEN modifiée

Elle est issue d'une modification de la méthode OLSEN en 1967. Cette méthode extrait plus particulièrement le phosphore lié au fer et à l'aluminium. Le réactif est une solution de sodium 0.5N et de fluorure d'ammonium 0.5N avec un pH de 8.5.

### 1.4.4. La méthode MEHLICH III

La solution d'extraction est composée de nitrate d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) et des acides acétique ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) et nitrique ( $\text{HNO}_3$ ). Cette solution d'extraction permet la solubilisation du phosphore acido-soluble et alcalino-soluble.

L'EDTA a pour rôle de chélater les oligo-éléments (Zn, Fe, Cu, Mn, etc.) et l'ion ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) est utilisé pour l'extraction des éléments solubles.

### 1.4.5. Autres méthodes d'extraction

D'autres méthodes d'extraction du phosphore assimilable existent, adaptées chacune à une zone agro-pédologique précise : la méthode de TRUOG (1930), de BONDORFF (1952), de DYER (1894), de DALLAL (1953), de SAUNDER (1956), de JORRET-HEBERT, etc.

## **CHAPITRE 2 : LE MILIEU D'ETUDE.**

### **2.1. La situation géographique**

Notre travail a eu pour cadre la station de recherche de Saria. Ce village est situé sur le plateau central du Burkina Faso, à 80 kms au Nord-Ouest de Ouagadougou et à l'Est de Koudougou ; les coordonnées géographiques de Saria sont :

-altitude : 300 m

-latitude : 12°16'N

-longitude : 2°9'W

### **2.2. Le climat**

Le climat est de type Nord Soudanien avec une saison pluvieuse de Mai à Octobre suivie d'une saison sèche caractérisée par une période fraîche de Novembre à Février et une période chaude de Mars à Avril.

La pluviométrie des 20 dernières années (1982-2001) donne des hauteurs de pluies variant entre 595.7mm(1985) à 1218.8mm(1994) ; Le nombre de jours de pluies par an varie de 51 à 86. (figure I) ; la pluviométrie de l'année 2001 a totalisé 723.1mm en 58 jours (figure II). Les températures varient entre 12-15°C en Décembre-Janvier et 40°C en Mars-Avril avec une moyenne de 28°C , et l'ETP est de 1700 à 2000mm/an ; l'humidité relative atteint son haut niveau de Juin à Août avec 60 à 80% contre 15% en Février.

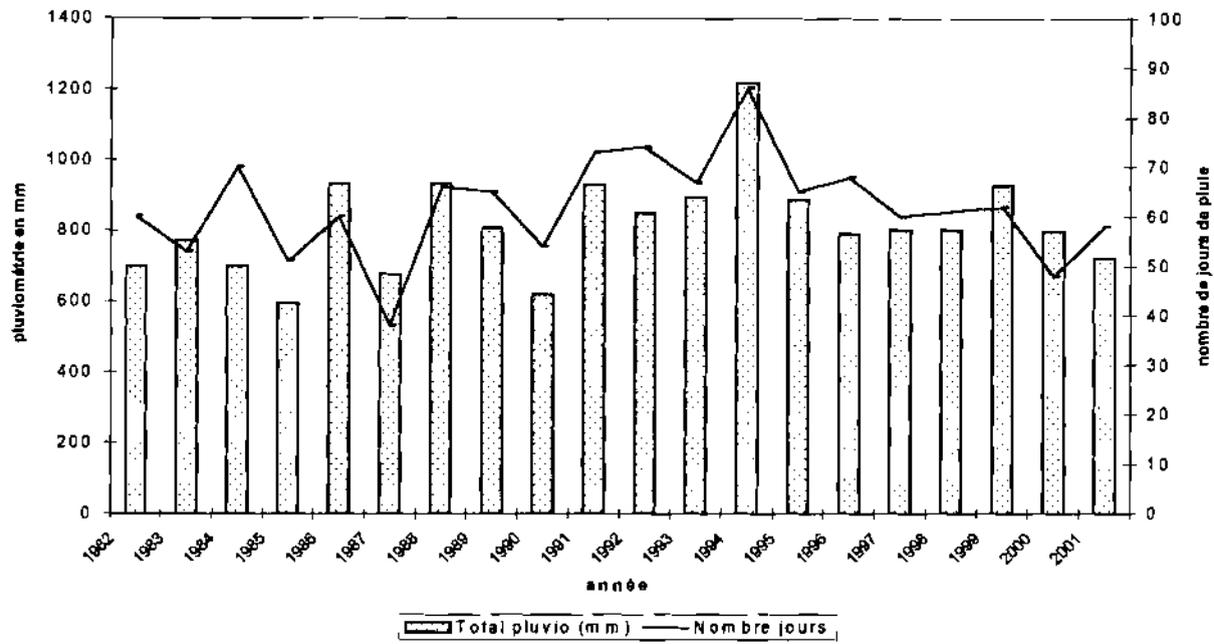


Figure I : Pluviométrie et nombre de jours de pluies de 1982 à 2001.

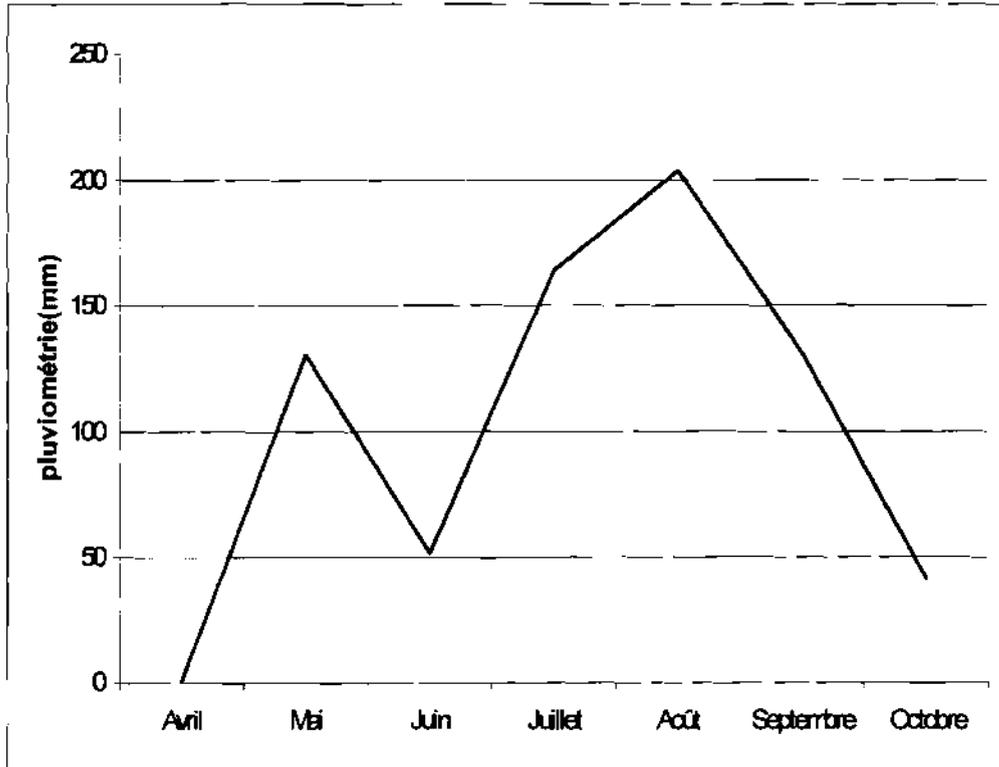


Figure II : Evolution mensuelle de la pluviométrie de Saria en 2001.

### **2.3. La végétation**

La végétation appartient au domaine phytogéographique Soudanien Septentrional (GUINKO,1984,cité par LOMPO,1993). Les principales espèces ligneuses et herbeuses sont : *Butyrosperum parkii*, *Parkia biglobosa*, *Tamarindus indica*, *Guiera senegalensis*, *Piliostigma reticulata* et *thoningii*, , *Lannea microcarpa*, *Adansonia digitata*, *Acacia albida*, *Ximania americana*, *Andropogon gayanus*, *Dactyloctenium aegyptiacum* et *Striga sp.* Les espèces reboisées sont essentiellement : *Eucalyptus camadulensis* et *Azadiracta indica*

### **2.4.La géologie et la géomorphologie**

La description des lithofaciès effectués par HOTTIN et OUEDRAOGO (1975), cités par ZERBO (1995) permet d'identifier 3 grands types de formations: un ensemble de migmatites et de granites indifférenciés, des septa de roches vertes (amphiboles et amphiboles pyroxénites) et enfin un massif intensif dioritique.

Le relief est plus ou moins homogène et faiblement prononcé, comprenant un résidu de buttes à cuirasse très démantelé ne dépassant pas 300m d'altitude, et un glacis polyphasique formé d'un haut versant de sol gravillonnaire à argilo-sableux et d'un bas versant court de sol argilo-sableux hydromorphe.

### **2.5.Les unités pédologiques**

Selon l'étude de JENNY (1964), cité également par ZERBO (1995), deux classes de sols sont rencontrés dans cette localité: la classe des sols hydromorphes et celle des sols à sesquioxydes de fer et de manganèse(sous classe des sols ferrugineux tropicaux). Les sols ferrugineux tropicaux constituant l'essentiel de la station sont issus de l'altération de roches granitiques.

De point de vue chimique, l'ensemble des sols de Saria est pauvre notamment en matière organique (inférieure à 1%), en phosphore assimilable. en azote et en potassium échangeable. Le domaine physique n'est pas meilleur en ce qui concerne la perméabilité et la stabilité structurale.

Les principales caractéristiques physico-chimiques des sols ferrugineux tropicaux de Saria sont données dans le tableau 1.

**Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques des sols de Saria.**

Argile(%)	13,2
Limons fins(%)	6,9
Limons gros.(%)	17,1
Sables fins(%)	25,9
Sables gros.(%)	36,9
Matière organique(%)	0,65
Carbone(%)	0,38
N total(p. 1000)	0,36
C/N	10,5
Phosphore total(mg/kg)	146
P. Assimilable Olsen(mg/kg)	13
P. Bray 2(mg/kg)	7
Ca (meq/100g)	1,57
Mg(meq/100g)	0,33
K(meq/100g)	0,05
Na(meq/100g)	0,2
Al(meq/100g)	0,03
H(meq/100g)	0,01
CEC(meq/100g)	1,83
pHeau	5,3
pHkcl	4,5
Al <sub>2</sub> O total(%)	9
SiO total(%)	8,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total(%)	2
Argiles dominantes	Kaolinite

Source : SEDOGO(1993).

## CHAPITRE 3: LE MATERIEL ET LES METHODES D'ETUDE.

### 3.1. Les méthodes d'étude.

#### 3.1.1. Le dispositif d'étude : l'essai entretien de la fertilité de Saria

Notre travail a eu pour support d'étude l'essai entretien de la fertilité de Saria.

##### 3.1.1.1. L'historique de l'essai

Le dispositif a été mis en place depuis 1960 avec pour objectif d'étudier les effets des différentes fumures minérale et organo-minérale et des successions culturales, sur les cultures et la fertilité des sols. Cette expérimentation a fait l'objet de nombreuses synthèses (PICHOT et al., 1981; SEDOGO, 1981 et 1993; GUIRA, 1988)

Le protocole de l'essai a subi de nombreuses modifications qui traduisent l'évolution des idées de l'IRAT/H.V. de l'époque, concernant la question du maintien de la fertilité des sols (ARRIVET, 1974).

A l'origine, 3 traitements en culture continue de sorgho (S29) étaient comparés: le témoin sans engrais (T), le traitement avec fumure minérale NPK:8-24-0 (fm), et le traitement avec fumure minérale: NPK 8-24-0 et organique: 5 tonnes de fumier /an (fmo).

Les blocs au nombre de 6 n'étaient pas en réalité de simples répétitions mais de traitements principaux destinés à tester l'effet de l'interaction de un ou de deux ans de jachère naturelle dans la monoculture de sorgho : c'était la " régénération de la fertilité ".

La jachère naturelle était malheureusement incompatible avec une utilisation intensive du sol, les paysans ont été progressivement amenés à n'y plus recourir. En 1963, l'idée de la jachère a été abandonnée avant que des traitements principaux (6 blocs) aient été effectivement différenciés, considérés comme de simples répétitions, on parlera alors

" d'entretien de la fertilité " par apport de matière organique. Les trois traitements T, fm et fmo ont été subdivisés chacun en parcelles de la façon suivante :

-fm en fumure minérale faible fm (8-23-0) et en fumure minérale forte FM (50-50-0) ;

-fmo en fumure organo-minérale faible fmo :fm +5 tonnes de fumier/ha/an et en fumure organo-minérale forte FMO : FM+40 tonnes de fumier/ha/an.

Puis en 1964, les modifications suivantes ont été effectuées : le témoin subdivisé en témoin sans engrais (T) et en culture d'engrais vert (E.V) tous les 4 ans avec apport de 40 kg de  $P_2O_4$ /ha et la fumure minérale NPK (20-24-0) sur la culture de sorgho. En 1965, les 6 traitements principaux sont à nouveau subdivisés pour introduire des rotations : la série a avec la culture continue de sorgho ; la série b avec la culture alternée du sorgho et du coton ; la série c avec la culture alternée du sorgho et de l'arachide.

Les exportations étaient totales dans les différents traitements ; les changements en 1970 et 1971 ne concernent que le niveau des fumures, la fumure d'entretien en ce qui concerne le phosphore devient supérieure à 25 kg de  $P_2O_4$ /ha. En 1971 la culture d'engrais vert a été modifiée en enfouissant les résidus de cultures ; en 1976, les 6 traitements définitifs sont les suivants :

- 1-T :Témoin absolu ;
- 2-fmr : fumure minérale faible avec recyclage des résidus de sorgho ;
- 3-fmo :fumure organo-minérale faible en apportant 5t/ha de fumier tous les deux ans ;
- 4-fm :fumure minérale faible ;
- 5-FMO :fumure organo-minérale forte en apportant 40t/ha de fumier tous les 2 ans ;
- 6-FM : fumure minérale forte exclusivement.

Il y a eu apport en 1978, de chaux agricole de manière uniforme sur toutes les parcelles à raison de 1.5 T/ha avant le labour de préparation. Egalement, en 1988, un autre apport de chaux agricole (74% CaO) est effectué toujours sur toutes les parcelles, à raison de 1.5T/ha. Il y a eu aussi, toujours en 1988, apport de KCl (100kg KCl) sur les traitements fm, fmr, et fmo sur les répétitions II, IV, et VI ; il sera apporté 100 kg de KCl sur les mêmes traitements sur les trois autres répétitions(I , III et V) en 1989.

Il faut signaler qu'un apport de 50kg de KCl a eu lieu sur ces mêmes traitements en 1980.

### 3.1.1.2. Le dispositif expérimental.

Le dispositif est un bloc Fisher de 6 traitements en 6 répétitions. Les 6 répétitions sont des blocs de 60m×25.2m tandis que les parcelles principales sont de 10m×25.2m avec chacune 3 parcelles secondaires contiguës (traitements fertilisation) de 10m× 8.4. Les 6 traitements sont :

- 1-T : témoin absolu ;
- 2- fmr : fumure minérale faible seule avec recyclage des résidus de pailles de sorgho ;

3 - fmo : fumure organo-minérale faible avec exportation des pailles de sorgho et apport de 5 tonnes/ha de fumier ;

4 - fm : fumure minérale faible seule avec exportation des pailles de sorgho ;

5 – FMO : fumure minérale forte avec exportation des pailles de sorgho et apport de 40 tonnes de fumier/ha tous les 2 ans ;

6 – FM : fumure minérale forte seule avec exportation des pailles de sorgho.

Il y a 3 rotations culturales cibles : le sorgho continu (série a), la culture sorgho/cotonnier (série b) et la culture sorgho/niébé (série c).

Les fertilisations au niveau des traitements sont les suivantes :

\*année où l'essai est entièrement en sorgho :

-Parcelles 2-3-4 (fmr, fmo, fm) : 100kg de mélange coton au semis et 50kg d'urée en début montaison ;

-Parcelles 5-6 ( FMO,FM) :100 kg de mélange coton 50kg de KCl au semis, 50kg d'urée en début montaison et 50g d'urée à la floraison ;

-Parcelle 3 (fmo) :5 tonnes/ha de fumier ;

-Parcelle 5 (FMO) :40 tonnes/ha de fumier.

\* année où l'essai est conduit en sorgho-légumineuse-cotonnier

Sur les parcelles en sorgho :

-traitements fmr, fmo ,fm :100kg de mélange coton au semis et 50 kg d'urée en début montaison ;

-traitements FMO et FM :100kg de mélange coton et 50kg de KCl au semis, 50kg d'urée en début montaison et 50kg d'urée à la floraison.

Sur parcelles en cotonnier :

-traitements fmr, fmo, fm :150kg de mélange coton au semis ,50kg d'urée en début floraison ;

-traitements FMO et FM :200kg de mélange coton au semis, 100kg d'urée en début floraison.

Sur parcelles en légumineuses :

-traitements fmr, fmo, fm :100kg de mélange coton au semis ;

-traitements FMO et FM :100kg de mélange coton et 50kg de KCl au semis.

Au cours de notre présente étude, quatre traitements sont concernés : le témoin, le fmo, le fm et le FM.

### 3.1.1.3. Les variétés utilisées dans l'essai entretien de la fertilité

Trois successions culturales sont mises en place dans l'essai entretien de la fertilité ; les différentes variétés utilisées depuis l'installation de l'essai en 1960 sont :

#### Le sorgho :

- la variété S29 de 1960 à 1973 : cette variété est une population locale améliorée à la station de Saria par l'IRAT ;
- la variété S6 de 1973 à 1982 :c'est une lignée semi locale issue du croisement CK60×S29, obtenue par l'IRAT du Mali ;
- la variété S10 de 1983 à 1985 est une lignée obtenue à la station de TARNA (IRAT-NIGER) ;
- la variété E35-1 de 1986 jusqu'à 1990, est une variété améliorée par l'ICRISAT et originaire d'ETHIOPIE ; la zone d'adaptation est la zone pluviométrique de 650 à 800 mm avec un rendement potentiel de 4 t/ha
- la variété ISCV 1049 de 1990 jusqu'à nos jours.

#### Le cotonnier.

A l'installation de l'essai, la variété BJA a été utilisée ;mais actuellement la variété F 135,vulgarisée par la SOFITEX ,est utilisée depuis 1991.

#### Les légumineuses

En ce qui concerne l'arachide, deux variétés ont été successivement utilisées : la 90 de Saria et la TE3 ; à partir de 1974 on est revenu au niébé (*vigna sinensis*) avec la variété 88-63 qui a été sélectionnée par l'IRAT à la station de TARNA, puis elle a été remplacée par la KN1 ; de nos jours, la variété KVVX 396-4-5-2D,avec un port érigé, est utilisée.



### 3.1.1.4. L'estimation des apports en phosphore et en NK des racines.

Pour estimer l'apport des racines en phosphore et des autres éléments majeurs(NK) au sol, des carottes de terre ayant les dimensions suivantes ont été prélevées :

- 20 cm entre poquets de cultures ;
- 40 cm entre lignes de cultures ;
- 50 cm de profondeur.

Ces blocs de terre contenant les racines des cultures et des herbacées seront lavés et passés au tamis de 2 mm et 200 microns, pour récupérer le maximum de racines qui seront ensuite séchées à l'étuve, puis pesées et analysées au laboratoire.

### 3.1.2. Les expérimentations en vases de végétation.

#### 3.1.2.1. Les objectifs.

A travers l'expérimentation en vase de végétation, les objectifs essentiels recherchés sont :

- Evaluer la production de matière sèche aérienne et racinaire des sols issus des différents traitements étudiés ;
- Evaluer la quantité de phosphore exporté par les plantes ;
- Déterminer la dose de TSP et de PN susceptible de favoriser un meilleur développement des cultures.

#### 3.1.2.2. Le protocole expérimental.

Deux types d'expérimentation en vase de végétation ont été mis en place.

La première avait pour objectif principal de choisir parmi trois espèces, celle qui convenait aux critères suivants :

- la taille des semences ;
- la vitesse et le taux de germination ;
- la capacité de production de matière sèche ;
- la capacité de repousse après plusieurs coupes.

Les trois espèces testées dont : *Sorghum alnum*, *Digitaria exilis* et *Pennisetum typhoides*.

Un sol provenant de l'essai entretien de la fertilité a servi de support à cette expérimentation menée de Décembre à Janvier dans un abri de la station de recherches de Kamboinsé.

La deuxième expérimentation visait à évaluer l'impact d'apport de trois doses de phosphore de deux sources différentes, sur la production de matière sèche et le phosphore exporté de sols soumis à différents modes de gestion.

L'étude est conduite en quatre répétitions dans des pots de 150 g de contenance. les traitements sont les suivants :

- Le témoin absolu sans engrais (T1) ;
- Le traitement de la fumure organo-minérale faible, fmo(T3) ;
- Le traitement de la fumure minérale faible, fm (T4) ;
- Le traitement de la fumure minérale forte exclusivement. FM (T6).

Seule la série a (sorgho continu) est concernée par l'expérimentation en vase de végétation.

Les doses de phosphore provenant des phosphates naturels du Burkina et du phosphate super triple sont 0, 50, et 100 mg P/kg de sol.

Une solution nutritive de départ a été apportée à tous les traitements et se compose de :

- 67.8 ppm d'azote avec l'urée comme source ;
- 75 ppm de Potassium issus de l'Hydrogencarbonate de Potassium ;
- 20 ppm de calcium issus du Chlorure de calcium ;
- 10 ppm de Magnésium provenant du sulfate de Magnésium.

L'essai est mis en place après broyage et tamisage de la terre à 2mm, l'humidité de départ est de 2/3 de la capacité maximale de rétention du sol. Les pots ont été recouverts de papier para film après ensemencement jusqu'à la germination avant d'être transférés en serre ; les arrosages sont effectués 3 fois par jour avec de l'eau distillée.

Quatre coupes sont effectuées à la 2<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup>, 6<sup>ème</sup> et 8<sup>ème</sup> semaine après semis ; la matière sèche aérienne est récoltée et séchée à l'étuve pendant 48 heures. puis elle est pesée et analysée. Un apport de 50 ppm d'azote par pot est effectué après chaque coupe. La matière sèche souterraine(racines) est obtenue par le lavage de la terre après toutes les coupes et s'effectue à l'aide d'un tamis de 2mm et 200 microns pour recueillir le maximum de racines ; ces racines sont également séchées à l'étuve et ensuite analysées.

L'essai en vase de végétation proprement dit a été réalisé à Saria de Février à Mars 2002.

### 3.1.2.3. Les analyses statistiques

L'analyse de variance sur les productions de matières sèches et de graines. est faite avec le logiciel GENSTAT . Le test de NEWMAN-KEULS a été utilisé pour la comparaison des moyennes. lorsque l'analyse de variance révèle une différence significative entre les différents traitements.

### **3.2. Le matériel d'étude.**

#### **3.2.1. Les sols**

Les sols de type ferrugineux tropical sont prélevés sur les quatre traitements étudiés (T1,T3,T4 etT6) de l'essai entretien de la fertilité sis à Saria. La profondeur de prélèvement est de 0-20cm.

En rappel, les quatre traitements sont définis de la manière suivante :

T1 : témoin absolu sans engrais ;

T3 : fumure organo-minérale faible (fmo) ;

T4 : fumure minérale faible exclusivement (fm) ;

T6 : fumure minérale forte exclusivement .

#### **3.2.2.Les sources de phosphore**

Le phosphate naturel du Burkina (BP) et le super triple phosphate (TSP) sont utilisés sur l'essai en vase de végétation ; les teneurs sont de 23.08% de  $P_2O_5$  et de 46% de  $P_2O_5$  respectivement pour le phosphate naturel et le TSP.

#### **3.2.3.Le matériel végétal**

Les cultures utilisées sur l'essai entretien de la fertilité depuis son installation jusqu'à nos jours sont : le cotonnier (variétés BJA et F135), le niébé (88-63, KN1, K VX 396-4-5-2D), l'arachide (90 de Saria, TE 3), le sorgho ( S29, S6, S10, E1-35, ICSV 1049) .

Au niveau de l'essai en vase de végétation, il est utilisé *le Sorghum almum* (sorgho fourrager), *le Pennisetum typhoides* (mil) et *le Digitaria exilis* (fonio).

### **3.3. Les méthodes d'analyses chimiques.**

#### **3.3.1 La mesure de pH( eau, KCl)**

La méthode électrométrique à l'électrode de verre à l'aide d'un pH-mètre avec un rapport sol/solution de 1/2.5 est utilisée.

#### **3.3.2.Le dosage de l'azote total des végétaux.**

En ce qui concerne l'azote total des végétaux (racines, matière sèche), on effectue une minéralisation par l'acide sulfosalicylique en présence de catalyseur (sélénium) pour convertir l'azote en sulfate d'ammonium  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , l'ammonium est d'abord chloré puis oxydé et la lecture de l'absorbance est réalisée à 660 nm.

#### **3.3.3.Le dosage du phosphore total des végétaux.**

Pour les végétaux, le phosphore total est dosé également par la minéralisation à l'acide sulfosalicylique et la lecture de l'absorbance est effectuée à 880nm.

#### **3.3.4.Le dosage du potassium des végétaux.**

Le dosage s'effectue de la même façon que le phosphore, c'est à dire par attaque à l'acide sauf que la lecture de l'émission se fait au spectrophotomètre à flamme.

#### **3.3.5. Le fractionnement du phosphore.**

Il est utilisé la méthode CHANG et JACKSON (1957) qui est fondée sur l'extraction sélective des formes solubles et des formes d'inclusion double. Sont extraits successivement :

- les formes de phosphore soluble par  $\text{NH}_4\text{Cl}$  1N ;
- le phosphore lié à l'aluminium par le fluorure d'ammonium 0.15N à pH de 8.5 ;
- le phosphore lié au fer par la soude 0.1N ;
- le phosphore lié au calcium par l'acide sulfurique 0.5N ;
- les phosphates d'inclusion par le citrate de sodium 0.3 N avec la réduction par le dithionate de sodium :

- les phosphates d'aluminium d'inclusion par une extraction au fluorure d'ammonium 0.5N ;
- les phosphates d'inclusion double de fer et d'aluminium par une autre extraction à la soude 0.1N.

Les réactifs utilisés sont l'acide ascorbique à 10g/l, le réactif sulfomolybdique et l'acide borique 0.8M à 0.50g/l.

Compte tenu des produits et matériels disponibles dans les laboratoires de Kamboinsé et du BUNASOLS, seules les quatre premières extractions ont été réalisées.

### 3.3.6. Le dosage du complexe d'échange par la méthode au chlorure de cobaltihexamine.

Cette analyse a été réalisée au sein du laboratoire du CIRAD à Montpellier(France) ; le principe de cette méthode au  $\text{Co}(\text{NH}_3)_6\text{Cl}_3$  est qu'il y a un échange entre les cations retenus par un échantillon de terre et les ions de cobaltihexamine d'une solution aqueuse .

Le complexe d'échange dosé dans le filtrat comprend une panoplie de cations échangeables :  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  et  $\text{H}^+$ .

La détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) se réalise par la mesure de la concentration dans le filtrat des ions de cobaltihexamine libres.

### 3.3.7. Le dosage du phosphore assimilable des sols

Cette analyse a également été effectuée à Montpellier , trois méthodes d'extraction du phosphore assimilable ont été réalisées sur les mêmes échantillons : BRAY1, OLSEN et OLSEN-DABIN (voir §1.4)

### 3.3.8. Le dosage de la matière organique des sols.

Le dosage du carbone et de l'azote organique a été de même effectué au laboratoire du CIRAD à Montpellier, par la méthode au CHN.

## CHAPITRE IV : RESULTATS-DISCUSSIONS.

### 4.1. Effets des modes de gestion de la fertilité des sols sur les rendements.

Les résultats recueillis sur l'essai porte sur 42 années de production. Nous examinerons ces résultats du point de vue de l'évolution annuelle des rendements grains de 1960 à 2001 et de celle des tendances (moyennes des rendements annuels). L'évolution des tendances masque les variations climatiques, notamment pluviométriques, et permet de voir les effets globaux liés aux traitements principaux.

#### 4.1.1. Evolution annuelle des rendements de la série a

Les résultats (tableau en annexe et figure III) montrent une variabilité d'une année à l'autre ; les observations suivantes méritent d'être soulignées :

- une baisse générale des rendements sur tous les traitements dès la deuxième année de mise en culture ;
- le témoin donne toujours les plus faibles productions par rapport aux traitements avec les fumures minérales seules et ceux avec fumures organo-minérales.

Pour le témoin absolu sans engrais avec exportation totale des résidus cultureux, le rendement baisse dès la deuxième année de culture ; cette baisse s'accroît jusqu'à descendre à 7 kg/Ha en 1978, année à laquelle un chaulage a été effectué . Cet amendement calcique permettra une augmentation sensible des rendements mais évoluant toujours à la baisse . Le chaulage de 1988 permettra de nouveau de relever la production de ce traitement témoin. De nos jours, on assiste encore à une baisse des rendements du témoin (124 kg/Ha en 2001).

En ce qui concerne le traitement fmo(organo-minérale faible), on observe également une baisse dès 1961, la production étant réduite même de plus de la moitié ; la production connaîtra une augmentation sensible de 1965 jusqu'en 1975 avant de décroître de nouveau ; en 1979, la production connaîtra une remontée jusqu'en 1997 puis une chute des rendements à partir de 1998 pour atteindre seulement 320 kg/Ha en 2001.

Le traitement fm(fumure faible exclusivement minérale), il y a aussi une augmentation globale des rendements par rapport au témoin, avec également une baisse des rendements dès la deuxième année de culture . Les rendements évoluent aussi en s'amenuisant jusqu'à

atteindre 81 kg/Ha en 1978. Le chaulage permettra de relever les rendements mais seulement pour 6 ans . Le deuxième chaulage permettra de relever de nouveau les rendements. De nos jours, il y a baisse des rendements qui sont de 424 kg/Ha en 2001.

La fumure minérale forte(FM) a la même évolution globale que la fm ; la production est en baisse depuis 1996 et elle n'est que de 412 kg/Ha en 2001.

#### 4.1.2.Evolution annuelle des rendements de la série c (tableau en annexe et figures IV et V):

Les évolutions sont identiques à celles observées sur la série a .On note cependant des rendements supérieurs à ceux de la série a sur tous les traitements pour la culture de sorgho. Pour la culture de niébé, les rendements des traitements ayant bénéficié de fumure (fmo, fm, FM) connaissent une augmentation des rendements par rapport au témoin absolu. Depuis 1987,les rendements n'atteignent guère 1000kg/Ha sur tous les traitements alorqu'ils avoisinaient les 2T/Ha en début de culture de niébé (1975).

La culture d'arachide n'a duré que 5 années de 1965 à 1973. On a constaté une baisse des rendements dès 1967, deuxième année de culture d'arachide ; il faut cependant noter que la fmo a donné les meilleurs rendements en arachide par rapport aux autres traitements avec fumure(fm et FM).

#### 4.1.3.Evolution des tendances dans les deux séries :

Comme souligné tantôt, l'évolution des tendances dans les deux séries(moyenne annuelle des rendements grains a) de 1960 à 2001 permet de masquer les variations d'ordre climatique et de voir clairement les effets liés aux traitements principaux. Le tableau en annexe et les figures VI, VII et VIII montrent les observations suivantes :

-Au niveau du témoin, la baisse est d'une manière générale continue c'est à dire que la moyenne baisse au fil des années . De 1660kg/ha à la 1<sup>ère</sup> année de culture, le témoin est passé à une moyenne annuelle de seulement 335kg/ha en 2001 sur la série a .

-Les traitements fm et FM (fumure minérale à faible et à forte dose) augmentent sensiblement les rendements par rapport au témoin mais n'échappent pas à une baisse comme au niveau du témoin . A la série a, fm passe de 1230kg/ha en 1960 à 858kg/ha en 2001 tandis que FM passe de 1230 à 1034

-Le traitement fmo donne les tendances les plus élevées que celles de fm et FM ; on note une faible variation des tendances au fil des ans qui demeurent pratiquement stables. A la série a fmo oscille entre 1600kg/ha à la 1<sup>ère</sup> année de culture et 1429kg/ha en 2001.

Au niveau de la série c, la tendance des rendements en sorgho pour fmo semble même évoluer à la hausse : de 1600 en 1960, la moyenne annuelle passe à 1955 en 2001.

Au niveau des rendements de niébé dans la série c, les tendances évoluent en général à la baisse.

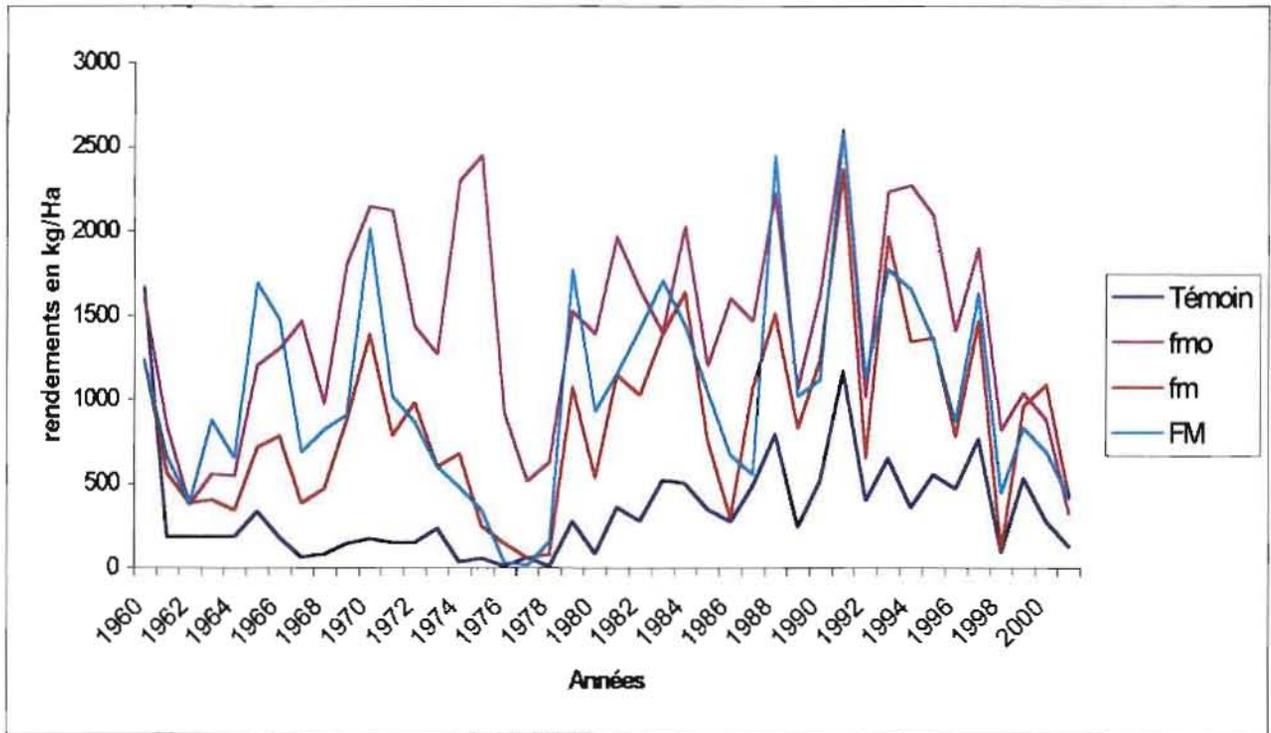


Figure III: Evolution des rendements des grains de sorgho de la série a (1960-2001).

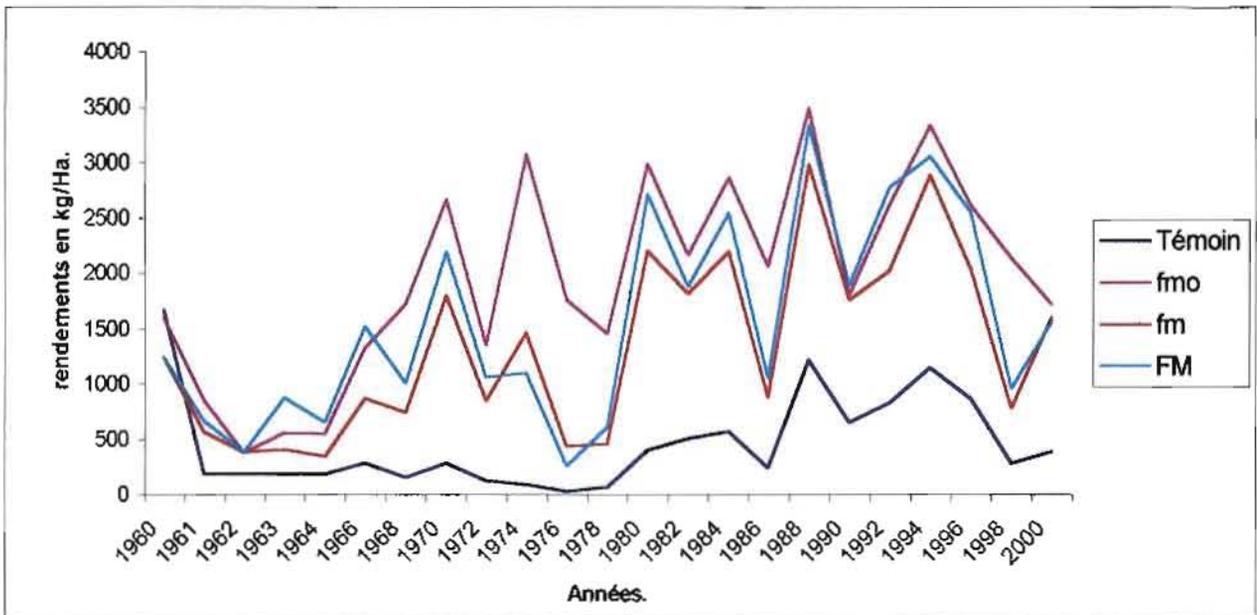


Figure IV : Evolution des rendements en grains de sorgho de la série c (1960-2000).

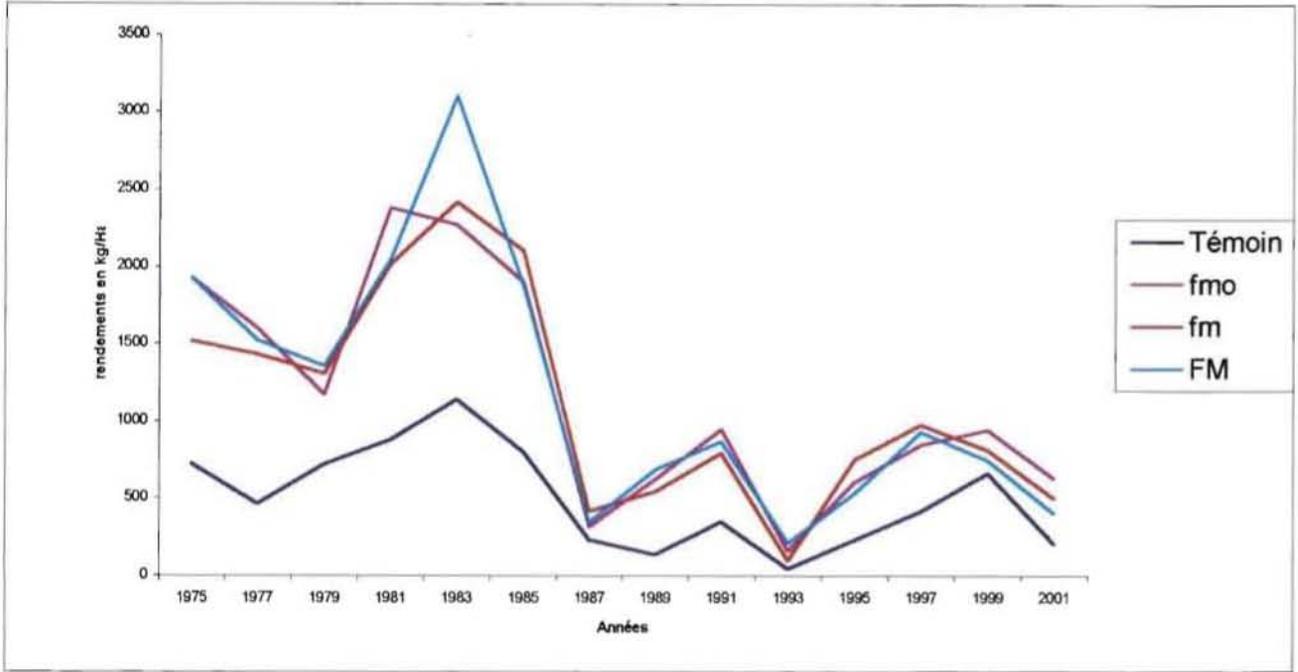


Figure V : Evolution des rendements de niébé de la série c (1975-2001).

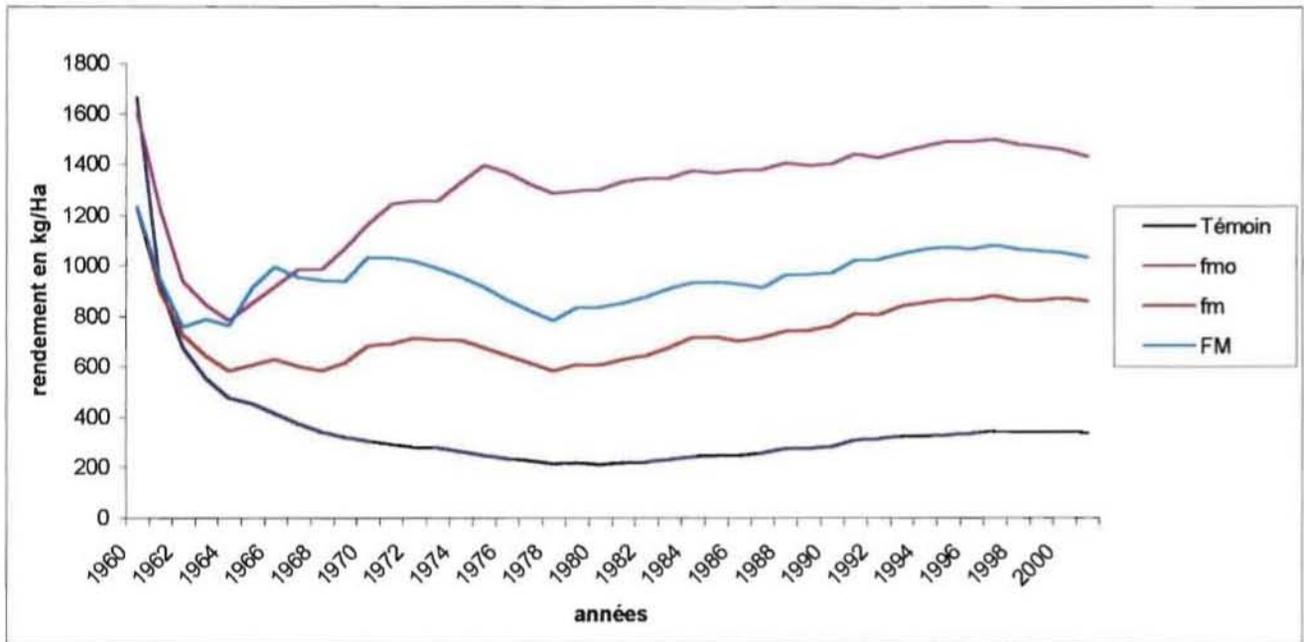


Figure VI : Evolution des tendances sur les rendements de sorgho de la série a (1960-2001).

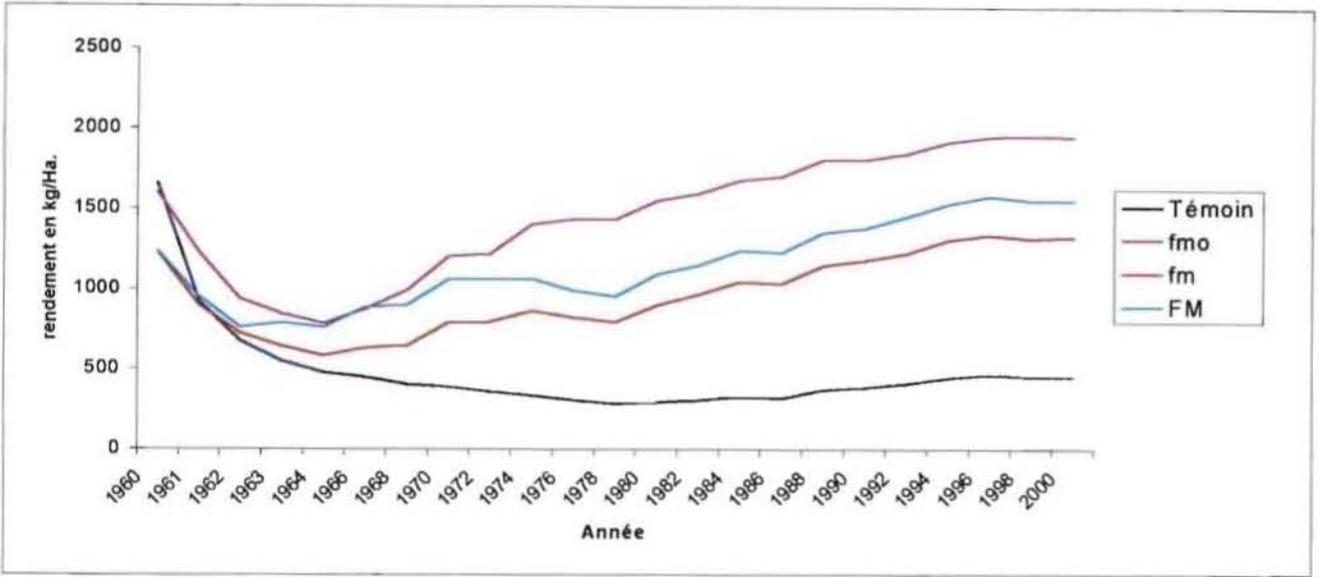


Figure VII : Evolution des tendances des rendements de sorgho de la série c (1960-2000).

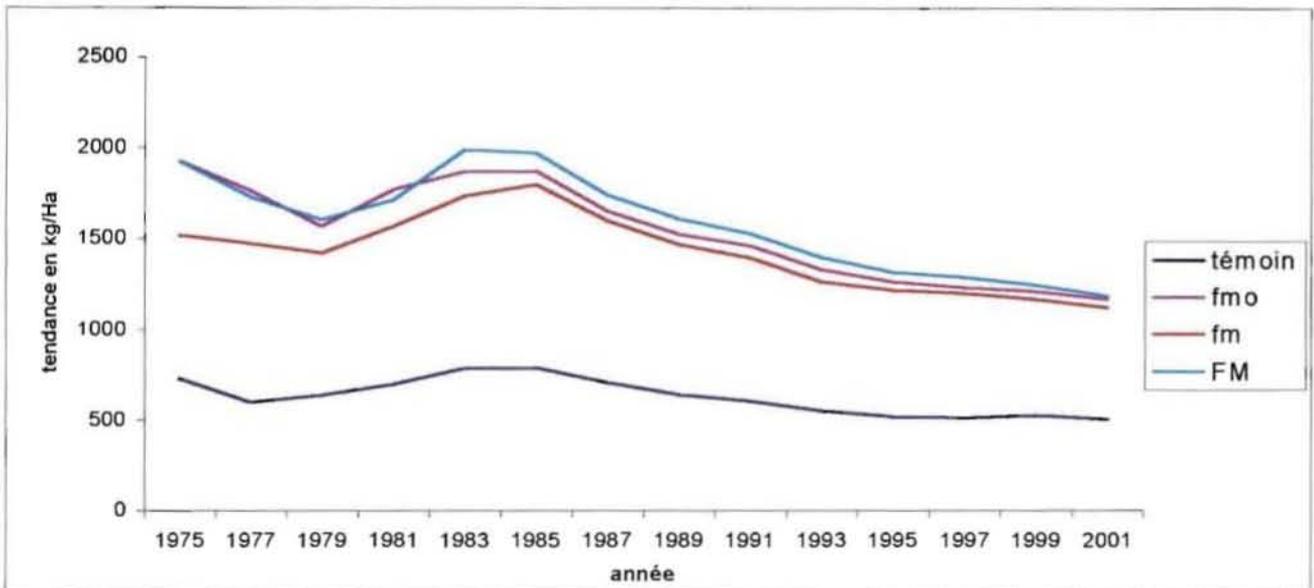


Figure VIII : Evolution des tendances des rendements de niébé de la série c (1973-2001).

#### 4.1.4. Discussions-conclusion

Dans le plateau central du Burkina, le sorgho représente la céréale de base de l'alimentation de la population. Cependant cette culture est confrontée à plusieurs contraintes telle que l'inadaptation des techniques culturales en milieu paysan, le faible niveau d'adoption des technologies ( variétés améliorées , utilisation des intrants,...) . L'intensification de la culture de sorgho est une alternative pouvant contribuer à augmenter la production par unité de surface, et partant conduire à l'autosuffisance alimentaire et à une diversification de l'utilisation du sorgho ( transformation) au Burkina Faso. Cette intensification passe par l'adoption de techniques culturales aptes à maintenir et à accroître la fertilité des sols.

Le but de l'expérimentation de longue durée réalisée sur l'essai entretien de la fertilité, est de mieux cerner l'effet des engrais, des amendements organiques et calciques et des rotations culturales sur la production de sorgho.

Cette partie de notre étude vise à faire une synthèse sur 42 années de culture(1960-2001), de façon à dégager des recommandations techniques pouvant contribuer à l'augmentation des rendements de sorgho.

D'une manière générale, on note de grandes fluctuations sur l'évolution des rendements sur tous les traitements ; fluctuations causées en grande partie par les variations pluviométriques (voir graphique I). Les observations faites sur l'évolution des rendements des traitements étudiés dans les 2 séries, permettent de retenir les synthèses suivantes :

- La culture de sorgho continue donne des rendements pratiquement nuls s'il n'y a pas d'apport de fertilisants ;
- la fumure minérale faible seule, induit à long terme, une baisse de la production ;
- la fumure minérale forte seule, permet dans un premier temps d'élever la production, mais aussi à long terme aboutit à une chute de la production; Cela est dû au processus d'acidification causé par les engrais minéraux et aussi à la décalcification engendrée surtout par le KCl (SOLTNER, 1994).
- l'application de la dolomie permet de relever les rendements de sorgho sur ces types de sols pour une durée variant entre 7 et 10 ans ;
- la fumure organo-minérale permet non seulement d'accroître la production mais d'avoir une certaine stabilité ; cela est confirmé par l'évolution des tendances des rendements ;
- la rotation culturale sorgho/légumineuses améliore les rendements par rapport à la culture continue :

-il y a une baisse générale des rendements dans les 2 séries depuis 1998 jusqu'à nos jours.

Ces synthèses rejoignent celles de PICHOT et SEDOGO (1981), de SEDOGO (1981), de GUIRA (1989) et de SEDOGO (1993).

Ces résultats montrent le rôle que joue la matière organique en l'occurrence le fumier sur la production, et confirment les observations de HIEN (1990).

Le chaulage en permettant de relever les rendements laisse voir les processus d'acidification intervenant après la mise en culture (SEDOGO,1993). En effet, selon HIEN (1990), le problème qui retient le plus d'attention au niveau des sols sous cultures, est la désaturation du complexe absorbant en calcium et en magnésium avec comme corollaire, l'acidification, l'apparition de l'aluminium échangeable et l'inefficacité des autres éléments apportés par les engrais. Pour PICHOT et al.(1981), les engrais minéraux procurent des augmentations de rendements pendant quelques années mais provoquent un appauvrissement du sol en bases échangeables et une acidification, préjudiciables aux cultures ;ils font apparaître une déficience en potassium et une toxicité aluminique dont les effets néfastes sur l'installation des plantules de sorgho, sont très importants.

La chaux favorise donc l'alimentation calcique des plantes et l'amélioration des propriétés chimiques des sols. PEARSON(1975), cité par GUIRA(1989), signale une rapide décomposition de la matière organique due à l'action du chaulage sur la microflore, ainsi qu'une amélioration sensible de la fixation symbiotique de l'azote. Le chaulage permet ainsi de relever le pH et de neutraliser l'aluminium échangeable (SEDOGO,1993).

L'alternance des cultures joue aussi un rôle favorable dans la production du sorgho car le sorgho est un mauvais précédent pour lui-même, étant donné qu'il est toxique pour lui-même par la production de composés phénoliques allélopathiques (NICOU et CHOPART,1973 ;cités par GUIRA,1989) .

La baisse générale actuelle des rendements fait penser de nouveau à une acidification des sols de l'essai, après le chaulage d'il y a une dizaine d'années ; alors un troisième chaulage de nos jours serait opportun pour relever les rendements.

## **4.2. Effets des modes de gestion de la fertilité des sols sur les bilans minéraux théoriques.**

### 4.2.1. Données de base.

Les bilans minéraux théoriques sont établis à partir de la différence entre les entrées et les sorties. Les sources d'entrées d'éléments minéraux sont composées essentiellement d'engrais (minéral et organique), d'apports par les eaux de pluies, de la biomasse racinaire et de la fixation symbiotique. Rappelons que la biomasse racinaire a été estimée à partir des carottes de terre qui ont été lavées et tamisées afin d'analyser les racines obtenues.

Les résultats d'apports des racines ressortent au tableau 4 et sont représentés par le graphique IX. Les tableaux 2 et 3 donnent respectivement les normes d'exportation selon ARRIVET(1974) et les différents apports selon SEDOGO(1993) et LOMPO(1993).

Quant aux sources de sorties et de pertes d'éléments minéraux, elles sont constituées par les exportations des cultures, du lessivage et de la lixiviation, du ruissellement, de l'érosion et de la volatilisation.

Tableau 2 : Quelques normes pour l'établissement des bilans minéraux théoriques.

	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Fumier de Saria	8.32 (en kg/T)	0.51 (%)	4.26 (%)
Eaux de pluies	5.4 (kg/ha/an)	2.1 (kg/ha/an)	3.4 (kg/ha/an)
Pertes(érosion, lixiviation, évaporation)	4 (kg/ha/an)	0.5 (kg/ha/an)	2 (kg/ha/an)

Source: ROOSE (1981), cité par LOMPO(1993)

**Tableau 3: Mobilisations et exportations pour une tonne de substances utiles(en kg).**

	Mobilisations minérales totales		
	N	P2O5	K2O
Arachide(1t de coque)	51	9	24
Sorgho(1t de grains)	34	7	17
Niébé(1t de grains)	50	17	48

Source : ARRIVET,1974.

**Tableau 4 : Apports des racines en N P K**

TRAITEMENTS	N(kg/ha)	P(kg/ha)	K(kg/ha)
T1-a	2,750	0,207	2,213
T1-c	10,074	0,463	4,163
T3-a	16,084	1,292	31,212
T3-c	13,150	1,553	8,199
T4-a	6,174	0,495	2,282
T4-c	9,670	0,989	2,557
T6-a	27,048	1,409	32,584
T6-c	15,592	1,833	9,775

Source : Résultats obtenus à partir des analyses chimiques des racines recueillies sur l'essai  
entretien de la fertilité.

#### 4.2.2. Les bilans minéraux théoriques.

Les tableaux 3 à 8 donnent les bilans minéraux en phosphore ,mais aussi en azote et en Potassium des 4 traitements dans les 2 séries.

##### 4.2.2.1. Le bilan théorique du phosphore dans la série a :

Le témoin est déficitaire d'une vingtaine de Kg à l'Hectare, alors que les traitements fmo et FM sont largement excédentaires en cet élément avec fmo qui est le plus fourni ; fm est aussi excédentaire et a un bilan intermédiaire entre fmo et FM.

##### 4.2.2.2. Le bilan théorique de N et K dans la série a :

Le témoin demeure déficitaire en Azote et en Potassium avec un bilan déficitaire plus prononcé en azote. Les traitements fmo, fm et FM sont excédentaires en ces 2 éléments ; il faut souligner que FM est le plus excédentaire en Azote et fmo en Potassium.

##### 4.2.2.3. Le bilan théorique du phosphore dans la série c.

Le témoin est le seul traitement déficitaire en phosphore dans cette série et ce déficit est plus accentué par rapport à la série a ; fmo, fm et FM sont excédentaires avec fmo détenant le bilan le plus positif.

##### 4.2.2.4. Le bilan théorique de N et K dans la série c. :

Le témoin et le fm sont déficitaires en Azote et en Potassium dans cette série. Le FM a le bilan théorique excédentaire le plus élevé en Azote tandis que fmo a le bilan le plus fourni en Potassium.

D'une manière générale, le témoin est déficitaire en N, P, et K dans les 2 séries, mais ce déficit est plus accentué dans la série c que dans la série a ; au niveau du fmo, le bilan théorique est excédentaire dans les deux séries.

Tableau 5 : Bilan théorique de l'azote de la série a.

Traitements	Prod. Totale(kg)	Qté mobilisé	N- Qté engrais	N- Qté fumier	N- Qté pluies	N- Qté racines	N- N.total apporté	N- perdu	N exporté	Total Bilan de N
Témoin	14083	478,82	0	0	226,8	115,5	342,3	168	646,82	-304,52
fmo	60045	2041,53	1350	1206,4	226,8	675,53	3458,73	168	2209,53	+1249,2
fm	36040	1225,36	1350	0	226,8	259,31	1836,11	168	1393,36	+442,75
FM	43445	1477,13	2525	0	226,8	1136,01	3887,81	168	1645,13	+2242,68

Tableau 6 : Bilan théorique du phosphore de la série a.

Traitements	Prod. Totale(kg)	Qté mobilisé	P- Qté engrais	P- Qté fumier	P- Qté pluies	P- Qté racines	P- P.total apporté	P- perdu	P exporté	Total Bilan de P
Témoin	14083	98,58	0	0	88,2	8,7	96,9	21	119,58	-22,68
fmo	60045	420,31	1121	739,5	88,2	54,26	2002,96	21	441,31	+1561,65
fm	36040	252,28	1121	0	88,2	20,79	1229,99	21	273,28	+956,71
FM	43445	304,12	1327	0	88,2	59,18	1474,38	21	325,12	+1149,26

Tableau 7 : Bilan théorique du potassium de la série a.

Traitements	Prod. Totale(kg)	Qté mobilisé	K- Qté engrais	K- Qté fumier	K- Qté pluies	K- Qté racines	K- K.total apporté	K- perdu	K exporté	Total Bilan de K
Témoin	14083	239,41	0	0	142,8	92,94	235,74	84	323,41	-87,67
fmo	60045	1020,77	601	6177	142,8	1310,9	8231,7	84	1104,77	+7126,93
fm	36040	612,68	601	0	142,8	95,84	839,64	84	696,68	+142,96
FM	43445	738,57	1656	0	142,8	1368,52	3167,32	84	822,57	+2344,75

Prod. : Production ; Qté : Quantité.

Tableau 8 : Bilan théorique du phosphore de la série c.

Traitements	Prod. Totale(kg)	Qté mobilisé	P- Qté engrais	P- Qté fumier	P- Qté pluies	P- Qté racines	P- P.total apporté	P- perdu	P exporté	Total Bilan de P
Témoin	20581	220,13	0	0	88,2	11,24	99,44	21	241,13	-141,69
fmo	67419	647,16	1121	739,5	88,2	51,46	2000,16	21	668,16	+1332
fm	51298	525,6	1121	0	88,2	25,24	1234,44	21	546,6	+687,84
FM	57802	580,92	1327	0	88,2	58,07	1473,27	21	601,92	+871,35

Tableau 9 : Bilan théorique de l'azote de la série c.

Traitements	Prod. Totale(kg)	Qté mobilisé	N- Qté engrais	N- Qté fumier	N- Qté pluies	N- Qté racines	N- N.total apporté	N- perdu	N exporté	Total Bilan de N
Témoin	20581	884,86	0	0	226,8	204,29	431,09	168	1052,86	-621,77
fmo	67419	2657,7	1350	1206,4	226,8	554,03	3337,23	168	2825,7	+511,53
fm	51298	2080,53	1350	0	226,8	277,38	1854,18	168	2248,53	-394,35
FM	57802	2322,95	2525	0	226,8	840,33	3592,13	168	2490,95	+1101,18

Tableau 10 : Bilan théorique du potassium de la série c.

Traitements	Prod. Totale(kg)	Qté mobilisé	K- Qté engrais	K- Qté fumier	K- Qté pluies	K- Qté racines	K- K.total apporté	K- perdu	K exporté	Total Bilan de K
Témoin	20581	588,15	0	0	142,8	109,18	251,98	84	672,15	-420,17
fmo	67419	1694,24	601	6177	142,8	832,67	7753,47	84	1778,24	+5975,23
fm	51298	1392,31	601	0	142,8	88,29	832,09	84	1476,31	-644,22
FM	57802	1533,5	1656	0	142,8	886,28	2685,08	84	1617,5	+1067,58

### 4.3. Effets des modes de gestion de la fertilité sur les caractéristiques physico-chimiques des sols. (tableaux 11 et 12) :

#### 4.3.1. Effets sur la matière organique

On note que la teneur en carbone organique du traitement fmo sur la série a dépasse celle du témoin et de FM qui en ont la même teneur. La fmo a la meilleure teneur avec 3.00mg/kg. Pour l'azote totale, on a la même observation que pour le carbone organique et fmo détient toujours la meilleure teneur avec 0.26mg/kg.

Au niveau de la série c, les teneurs sont sensiblement supérieures à celles de la série a ; fm et le témoin ont les mêmes teneurs en carbone ; fmo détient les plus fortes valeurs pour le carbone et l'azote.

#### 4.3.2. Effets sur la somme des bases échangeables.

(SBE :Ca + Mg + K + Na).

Dans la série a, le témoin détient la forte SBE soit 2.53 meq/100g contre seulement 1.46 pour FM ; la fmo a une valeur intermédiaire de 2.03 meq/100g.

Au niveau de la série c, on note toujours la supériorité du témoin par rapport aux autres traitements avec encore la plus faible valeur pour FM ; mais les valeurs en général dans cette série sont faiblement inférieures à celles de la série a. La fmo a une valeur intermédiaire de 2.00mq/100g.

#### 4.3.3. Effets sur la capacité d'échange cationique (C.E.C)

On constate que dans l'ensemble , la C.E.C est plus importante dans la série c que dans la série a. Aussi le témoin a la plus forte valeur que les autres traitements dans les deux séries ; les plus faibles valeurs reviennent à FM. La fmo a une valeur intermédiaire : 2.1 à la série a et 2.15 à la série c ; la fm a des valeurs comprises entre celle de fmo et de FM.

#### 4.3.4. Effets sur le pH

Le traitement témoin a le pH le plus élevé, suivi de fmo ; FM a le pH le plus acide de tous les traitements dans les 2 séries. Les traitements de la série c ont des pH plus acides que ceux de la série a . Dans l'ensemble, la tendance est à la diminution des pH des traitements, surtout ceux bénéficiant des apports d'engrais minéraux seuls.

#### 4.3.5. Effets sur l'Aluminium échangeable

Les teneurs en aluminium échangeable sont nulles pour le témoin et la fmo dans les deux séries. fm a des teneurs variant entre 0.04 et 0.05 meq/100g dans les séries a et c. Cependant FM accuse les teneurs de 0.04 meq dans la série a et jusqu'à 0.08meq dans la série c.

#### 4.3.6. Effets sur le phosphore assimilable

Hormis le témoin, les valeurs de Bray1 sont supérieures à celles de Olsen pour la série a ; pour la série c, Bray1 est également supérieure à Olsen même pour le témoin ;Olsen-Dabin est supérieure à Bray1 et Olsen pour tous les traitements dans les 2 séries .Les valeurs dans la série a pour les 3 méthodes dépassent en général celles de la série c ;les témoins des 2 séries accusent les plus faibles valeurs des 3 méthodes.

Pour Bray1, fmo a la plus forte valeur dans les séries a et c :19.66 et 14.50 respectivement ;FM a la plus faible valeur par rapport aux 3 traitements avec fumure(fmo, fm et FM) : 14.39 pour la série a et 9.62 pour la série c. fm a des valeurs intermédiaires entre fmo et FM.

Concernant la méthode Olsen, c'est toujours fmo qui détient les plus fortes valeurs pour les séries a et c .Par rapport aux 3 traitements avec fumure(fmo, fm et FM), FM détient la plus faible valeur dans la série a tandis que fm a la plus faible valeur à la série c.

Quant à la méthode Olsen-Dabin, fmo a les plus fortes valeurs ; il faut souligner que les valeurs de fmo sont de 3 à 4 fois supérieures à celles du témoin respectivement dans les séries a et c. Avec cette méthode, c'est toujours FM qui accuse les plus faibles valeurs dans les 2 séries.

#### 4.3.7. Effets sur la granulométrie(tableau 12) :

Il y a en général la prédominance des sables sur l'ensemble des traitements des 2 séries ( entre 61 et 67%). Ensuite il y a les limons qui composent (après les sables) les sols des différents traitements( entre 20 et 23%);les argiles détiennent les plus faibles valeurs(entre 10 et 16%). Il faut noter que les taux en sables des traitements fmo, fm, et FM dépassent en général ceux du témoin.

Tableau 11 : Caractéristiques chimiques de l'EEF/Saria.

	Série a				Série c			
	Témoin	fmo	fm	FM	Témoin	fmo	fm	FM
C organique	2,4	3	2,5	2,4	2,5	3,2	2,5	2,9
N total	0,18	0,26	0,21	0,18	0,2	0,27	0,21	0,24
C/N	13,3	11,5	11,9	13,3	12,5	11,9	11,9	12,1
Ca éch	2,1	1,61	1,43	1,14	2,04	1,58	1,38	1,27
Mg éch	0,31	0,31	0,2	0,17	0,32	0,31	0,22	0,18
K éch	0,1	0,11	0,09	0,13	0,08	0,1	0,07	0,12
Na éch	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Al éch.	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,05	0,08
SBE	2,53	2,03	1,73	1,46	2,45	2	1,68	1,59
CEC	2,47	2,11	1,86	1,57	2,55	2,15	1,81	1,81
pHeau	6,28	5,72	4,9	4,75	5,65	5,5	4,91	4,47
pHkcl	5,71	5	4,33	4,29	5,3	5,06	4,23	4,17
P. BRAY I	3,31	19,66	16,81	14,39	2,99	14,5	10,42	9,62
P. OLSEN	3,58	14,16	12,48	10,04	1,74	10,76	6,2	6,48
P.OLSEN-DABIN	10,7	38,6	35,7	29,4	7,4	30,2	36	21,35

C organique en g/kg.

N organique. P. Bray, P. Olsen. et P. Olsen-Dabin en mg/kg.

Les cations échangeables (Mg, Ca, K, Na, Al), SBE et CEC en meq/100g.

Tableau 12 : Caractéristiques granulométriques de l'EEF/Saria.

	ARGILES %	LIMONS FINS %	LIMONS GROSSIERS %	SABLES FINS %
Témoin-a	12,7	5,6	20,3	26
fmo-a	10,6	2,6	18,3	33,6
fm-a	16,5	5,4	16,9	28,1
FM-a	13,9	4,1	17,3	29
Témoin-c	16,1	5,6	17	26,7
fmo-c	10,2	4,8	18,3	28,4
fm-c	14,1	4,8	17,8	26,4
FM-c	10,4	8,1	13,8	28,5

#### 4.3.8. Discussions-conclusion.

L'établissement des bilans minéraux théoriques, malgré les insuffisances que cela présente (HIEN,1990 ; LOMPO,1993) est indispensable si l'on veut aboutir à un système agricole satisfaisant, stable et qui assure en même temps le maintien ou l'amélioration de la fertilité des sols cultivés .

Au niveau du phosphore, tous les traitements sauf le témoin, ont des bilans positifs et cela semble s'expliquer par les apports non négligeables par les eaux des pluies, les engrais minéraux et le fumier pour fmo. Cependant il faut souligner qu'un sol fourni en  $P_2O_5$  n'est pas forcément riche en phosphore biodisponible à cause des processus d'insolubilisation.

Au niveau de l'azote, tous les traitements de la série a , à l'exception du témoin, ont des bilans positifs, les formules de fumure proposées semblent être équilibrées pour l'enrichissement des sols des traitements ayant bénéficié des fertilisants.

En ce qui concerne le potassium, seul les traitements témoins sont déficitaires ; tous les autres traitements ont un bilan positif . En effet, l'apport du fumier enfoui par un labour améliore nettement les teneurs en K et en Ca échangeables par rapport aux traitements labourés sans fumier (CHOPART J.L. et al. ,1994) .

Ces bilans théoriques font ressortir que les témoins sont déficitaires pour tous les trois éléments majeurs N, P et K. Ceci montre que la culture sans apport de fertilisants minéraux et organiques, avec exportation totale des résidus cultureux, conduit à un épuisement des réserves dans les sols ferrugineux lessivés.

Les apports en éléments N, P et K par les racines, ont permis de montrer le rôle primordial de ces dernières sur la fertilisation des sols ; en effet, la croissance du système racinaire détermine les quantités d'eau et d'éléments minéraux que la plante peut absorber pour se développer, et le rendement est fortement corrélé à la densité racinaire de la culture qui est fonction de la porosité du sol ( LAVIGNE D.P.,1996).

Cependant, quelques insuffisances sont à souligner quant à la contribution des racines pour l'établissement des bilans minéraux :

- Il n'y a pas de données quant aux apports par les racines de l'arachide qui a été cultivé dans la série c de 1965 à 1973 ;
- la réalisation des carottes de terres pour le prélèvement racinaire dans les parcelles, a été faite sans répétitions, à cause de la taille des trous pouvant dégrader l'essai.

Au niveau des caractéristiques chimiques des sols, les trois méthodes d'extraction du phosphore assimilable (BRAY<sup>1</sup>, OLSEN et OLSEN-DABIN) ont permis de montrer que fmo par sa disponibilité en matière organique, améliore la disponibilité en phosphore assimilable pour les cultures. Ces résultats confirment que la méthode OLSEN modifiée est adaptée pour les sols tropicaux à teneur élevée en hydroxydes de fer et d'aluminium, et extrait donc mieux le phosphore lié à l'aluminium du fait du  $\text{NH}_4\text{F}$ , et du fer à cause du pH (COMPAORE, 1996).

Au niveau des composés organiques(carbone et azote), l'apport de fumier sur le traitement fmo a permis d'accroître sa teneur en carbone et en azote par rapport aux autres traitements ; cette même matière organique a amélioré la capacité d'échange cationique (CEC) et fmo détient également une meilleure somme des bases échangeables (SBE).

Les résultats sur le pH des traitements montrent une tendance générale à l'acidification dans les deux séries . Cette variation du pH à la baisse s'explique par la mise en culture des parcelles depuis quatre décennies, qui induit les effets suivants :

- la production d'acides par activités biologiques (racines et microbes) ;
- l'utilisation d'engrais acidifiants et même décalcifiants (KCl) ;
- La désaturation du complexe absorbant.

Cette acidification s'accompagne en général d'une remontée du taux de l'aluminium échangeable et donc un autre chaulage serait indispensable pour diminuer le processus d'acidification..

#### **4.4. Effets des modes de gestion de la fertilité sur les formes du phosphore des sols.**

##### **4.4.1. Les résultats.**

L'analyse statistique révèle des différences hautement significatives (voir tableau 13 ) entre les traitements pour chaque forme de phosphore.

Quatre formes de phosphore ont été extraites en raison des produits et du matériel disponibles aux laboratoires de Kamboinsé et du BUNASOLS ; il s'agit de l'extraction des phosphore soluble, lié à l'aluminium, au fer et au calcium.

D'une manière générale, les quatre formes de phosphore dans les différents traitements des deux séries, se classent en terme de quantité de la façon suivante :  $P\text{-Fe} > P\text{-Al} > P\text{-Ca} > P\text{-soluble}$ . On observe donc que le phosphore lié au fer est le plus dominant, suivi du phosphore lié à l'aluminium .

Le phosphore soluble est le plus faible en terme de teneur au niveau des différents traitements, il est même quasiment nul dans le FM de la série a ; il est à souligner que les traitements de la série c détiennent des valeurs sensiblement supérieures en phosphore soluble par rapport aux mêmes traitements de la série a.

Le phosphore lié au fer, avec des valeurs plus élevées, croît lorsqu'on passe de T1 à T6 dans la série a . Dans la série c, les teneurs sont plus faibles et les traitements témoins, fm et FM ont des valeurs sensiblement voisines.

Quant au phosphore lié à l'aluminium, les teneurs sont assez importantes et celles des traitements de la série a sont plus élevées que celles des traitements de la série c ; les témoins détiennent les plus faibles teneurs dans les 2 séries.

Contrairement aux 2 fmo qui accusent les plus fortes teneurs en P-Al, les fm ont des teneurs intermédiaires entre fmo et FM.

Le phosphore lié au calcium accuse des valeurs relativement faibles par rapport à P-Fe et P-Al ; les témoins des 2 séries détiennent toujours les faibles teneurs pendant que les fmo comportent les plus fortes.

Tableau 13 : Les 4 fractions de phosphore dans les traitements étudiés  
(en ppm).

Traitements	P.Sol.	P-Al	P-Fe	P-Ca
Témoin-a	1,703	7,246	10,921	1,806
Fmo-a	0,680	37,595	27,156	5,246
Fm-a	0,339	29,286	30,916	3,870
FM-a	0,000	25,891	34,334	2,150
Témoin-c	1,107	2,649	21,516	1,118
Fmo-c	1,618	21,790	14,510	3,182
Fm-c	1,248	17,517	21,174	2,666
FM-c	0,731	16,150	23,567	3,182
Lsd	0.234	1.767	2.85	0.579
probabilité	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

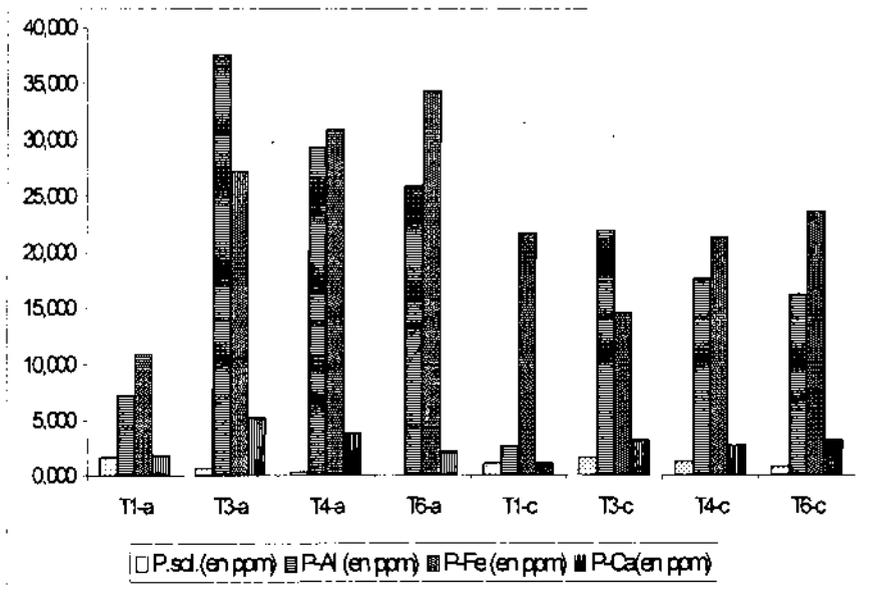


Figure IX : Les formes de phosphore par traitement.

#### 4.4.2. Discussions- conclusion

Le fractionnement du phosphore sur les sols des 4 traitements de l'essai, réalisé par la méthode de CHANG et JACKSON (1957), fait ressortir que le phosphore lié au fer et celui lié à l'aluminium sont les plus dominants ; le phosphore lié au calcium et le phosphore en solution demeurent faibles. Le P-Al, le P-Fe et le P-Ca sont plus ou moins échangeables et peuvent être disponibles aux cultures.

Cela confirme que les sols ferrugineux tropicaux sont bien fournis en hydroxydes de fer et d'alumine qui ont un fort pouvoir fixateur de phosphore supérieur à celui des argiles (SOLTNER, 1994). Ainsi en sols acides, cette fixation est abondante et très énergique et ce processus rend difficile l'alimentation phosphatée des cultures ; il faut signaler qu'en sols très acides (pH < 4.5) et pauvres en oxygène, les ions  $Fe^{3+}$  et  $Al^{3+}$  précipitent avec le phosphore pour donner des phosphates de fer et d'aluminium difficilement assimilable par les plantes.

Au niveau de P-Fe, on observe que fmo a des valeurs inférieures à celles de FM et de fm ; cela est dû à l'effet solubilisant de la matière organique. En effet, SOLTNER (1994) constate que lorsqu'on ajoute à un sol des composés organiques (humus), les phosphates fixés sur les oxydes ferriques ont tendance à être libérés donc rendus disponibles pour les plantes.

Pour SAMAKE (1987), cité par LOMPO (1993), il y a la libération de charges électro-négatives lors de la minéralisation du fumier et ces charges peuvent entrer en compétition avec les ions  $PO_4^{3-}$  sur les sites de fixation de ces derniers ; cette compétition aboutit à la fixation des ions phosphates sur des sites de plus faible énergie, rendant ainsi leur utilisation ultérieure par les plantes, plus facile.

La matière organique joue donc un rôle essentiel sur la nutrition phosphatée des plantes ; elle permet par sa minéralisation de fournir du phosphore assimilable aux cultures, en solubilisant les phosphates insolubles par ses acides organiques, et protège le phosphore assimilable contre les risques d'insolubilisation en le réorganisant momentanément sous forme de corps microbiens ou en le combinant à l'humus sous forme d'humophosphates (SOLTNER, 1994).

Les faibles teneurs des formes liées au fer et à l'aluminium dans la série c par rapport à la série a s'expliquent par l'acidité induite des légumineuses qui solubilise ces formes liées de phosphore : en effet, en milieu acide, les légumineuses sont plus capables d'absorber le phosphore apporté sous forme de phosphate naturel que les graminées (FIRDAUS, 2001). Cela se confirme par les teneurs de phosphore en solution relativement plus élevées dans les traitements de la série c que ceux de la série a.

D'une manière générale, les résultats permettent de voir clairement que le phosphore dissout dans la solution du sol est très faible et donc que la nutrition phosphatée des cultures se fait par la libération progressive de phosphore assimilable à partir des formes liées.

#### **4.5. Résultats des expérimentations en vases de végétation.**

Rappelons que cet essai en serre a pour but de tester l'effet de trois doses de phosphore de deux sources différentes sur la production de matière sèche et l'absorption du phosphore par le sorgho fourrager. Le protocole a été décrit dans le chapitre « matériels et méthodes d'étude » ; il faut cependant rappeler que le dispositif est un factoriel 4 fois 5 avec 4 répétitions.

Les traitements étudiés sont :

- le Témoin T1 ;
- le fmo T3 ;
- le fm T4 ;
- le FM.

Les facteurs au nombre de 5 sont : 0 ppm de P ; 50 ppm et 100 ppm de P avec le phosphate naturel ; 50 ppm et 100 ppm de P avec le TSP.

##### **4.5.1. La détermination de l'espèce végétale pour l'essai vase**

Cette détermination a été conduite en serre à Kamboinsé de Décembre à Janvier et a concerné trois espèces végétales dont les semences sont disponibles à la station : le Sorgho fourrager, le mil et le fonio. Il a été utilisé le sol issu du traitement Témoin de la série b (rotation sorgho/cotonnier) de l'essai entretien de la fertilité de Saria.

Les observations suivantes ont été réalisées pendant l'essai-test :

- le sorgho et le fonio ont une bonne vitesse de germination (95% de germination au bout de 3 jours) ;
- le mil germait lentement car il a fallu une dizaine de jours pour obtenir le même taux de germination que le sorgho et le mil ; ce qui ne permettait pas de réaliser les 4 coupes préconisées selon les délais requis.

Les figures X , XI, XII et XIII sur la production de matière sèche au bout de 4 coupes, permet d'observer que le fonio repousse mal après seulement deux coupes pendant que le mil résiste aussi bien aux coupes après avoir mis une dizaine de jours pour germer.

Considérant toutes ces observations, nous avons choisi le sorgho fourrager pour conduire l'essai en vase de végétation proprement dit dans la serre de Saria de Mars à Avril.

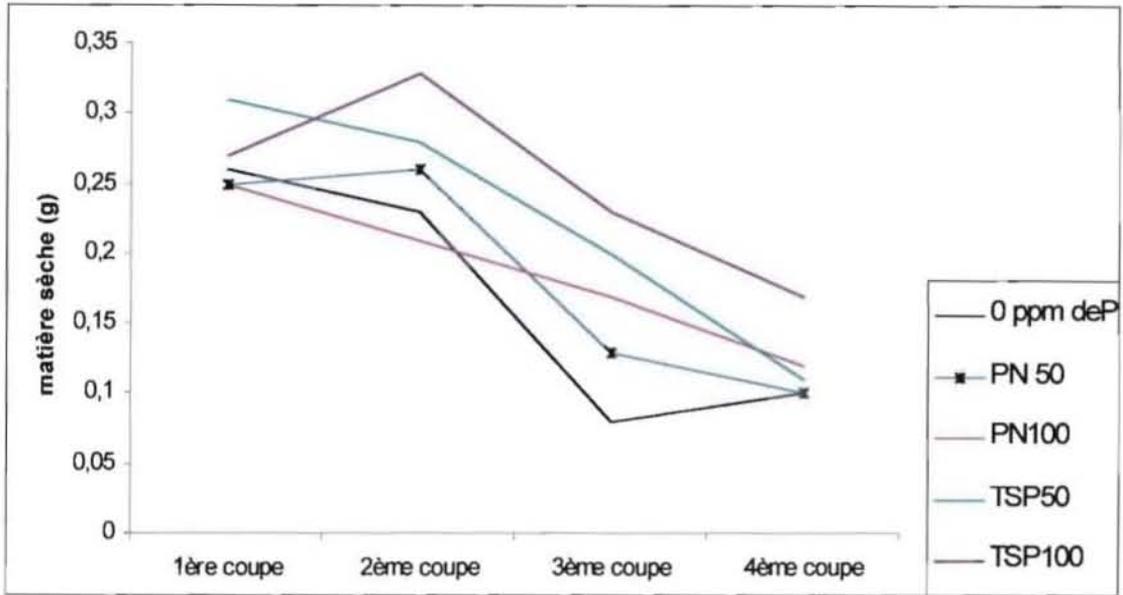


Figure X : Evolution de la matière sèche produite par le sorgho fourrager.

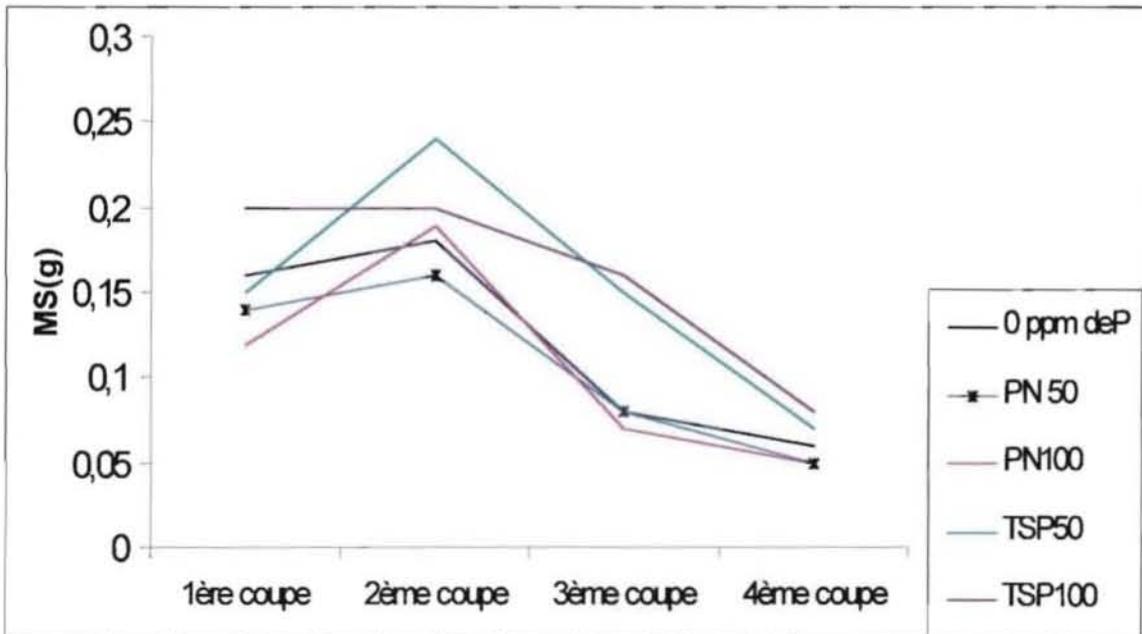


Figure XI : Evolution de la matière sèche produite par le fonio.

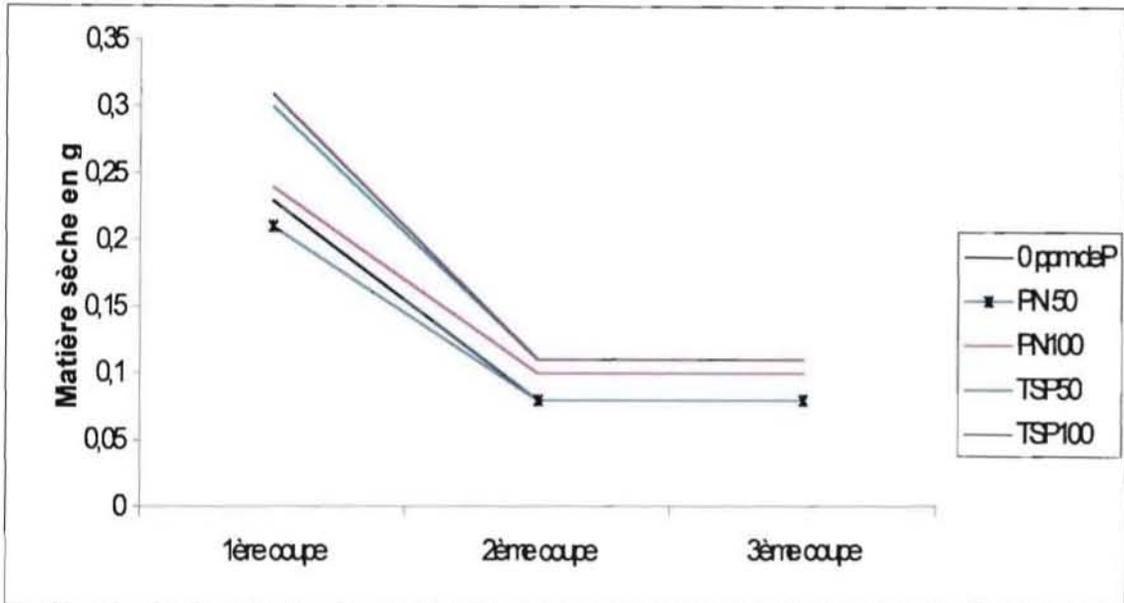


Figure XII : production de la matière sèche du mil.

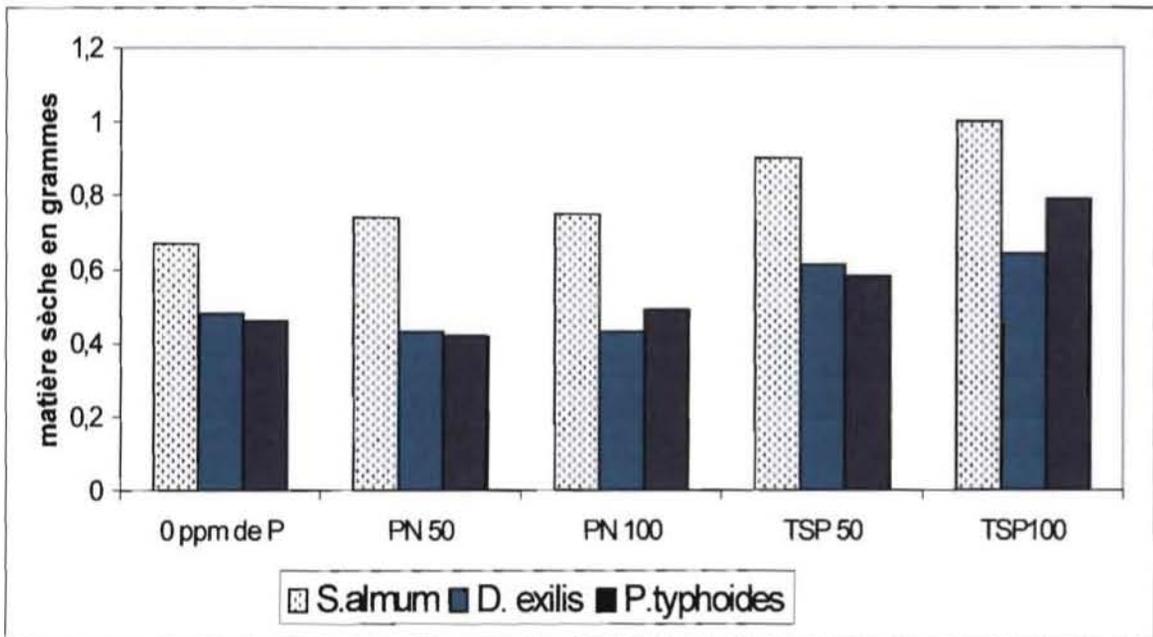


Figure XIII : Cumul de la matière sèche des trois cultures.

#### 4.5.2. Effets de sources et de doses de phosphore sur la production de matière sèche et le phosphore exporté de sols soumis à différents mode de gestion.

Au départ, il était prévu de réaliser 4 coupes respectivement à la 2<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup>, 6<sup>ème</sup> et 8<sup>ème</sup> semaine après semis. Malheureusement, les plants subissaient des dessèchements après les premières coupes ; cela est dû probablement à la forte chaleur de Mars-Avril et à l'orientation de la serre (perpendiculairement aux rayons solaires). Alors deux coupes ont seulement été réalisées.

Les résultats de ces 2 coupes sont regroupés dans le tableau 14 et les graphiques XIV, XV, XVI et XVII. Les résultats des analyses statistiques figurent en annexe.

##### 4.5.2.1. Effets sur la production de matière sèche.

###### a) Première coupe (2 semaines après semis, figure XIV)

Le témoin donne les faibles productions de matière sèche variant entre 295 et 356 mg pour les 5 facteurs ; le TSP50 donne la production supérieure pour ce témoin.

Le fmo donne de fortes productions de matière sèche par rapport au témoin et au fm, production oscillant entre 359 et 377 mg de M.S. avec le TSP 100 qui donne la meilleure production.

Le FM donne des productions de MS sensiblement supérieures à celles de fmo et l'on note une augmentation assez nette avec PN50 et PN100 par rapport à 0ppm contrairement à T1 et T3 ou les productions avec 0ppm, PN50 et PN100 sont approximativement voisines.

fm donne des productions intermédiaires entre le témoin et fmo avec 0ppm, PN50 et PN100.

###### b) Deuxième coupe (4 semaines après semis, figure XV)

Il y a eu une baisse importante des rendements de MS par rapport aux résultats de la 1<sup>ère</sup> coupe. Les problèmes de dessèchement des plants après la 1<sup>ère</sup> coupe évoqués plus haut expliquent ce phénomène. On note néanmoins une différence de production de MS entre les traitements et il y a une augmentation de MS quand on évolue de 0ppm à TSP100 pour tous les traitements ; cependant les productions de MS avec PN100 et TSP50 sont sensiblement

voisines pour tous les 4 traitements alors que le TSP100 donne généralement les meilleures productions pour tous les traitements.

c) Production de matière sèche souterraine (racines)(figureXVI)

Le témoin donne les plus faibles rendements racinaires par rapport aux 4 traitements ; le TSP100 donne la plus forte production pour ce traitement.

Le fmo donne des productions de racines supérieures au témoin et à fm.

Le FM donne les meilleures productions racinaires par rapport aux 4 traitements ; notons que dans l'ensemble les poids des racines produites augmentent quand on évolue de 0ppm à TSP100 pour l'ensemble des traitements.

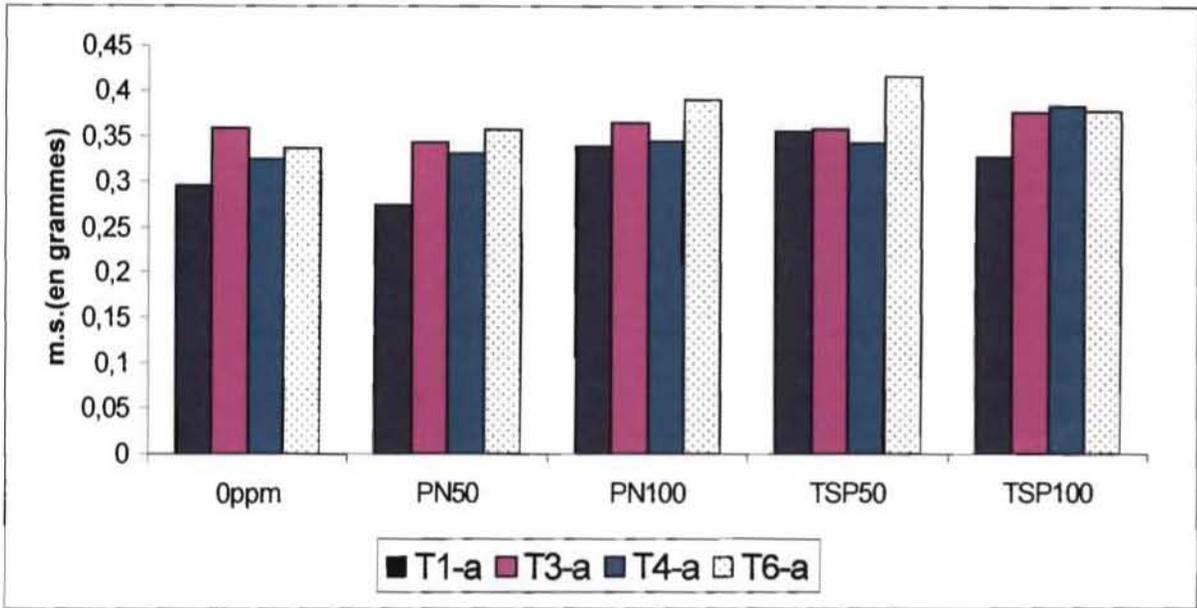


Figure XIV : Production de matière sèche à la première coupe.

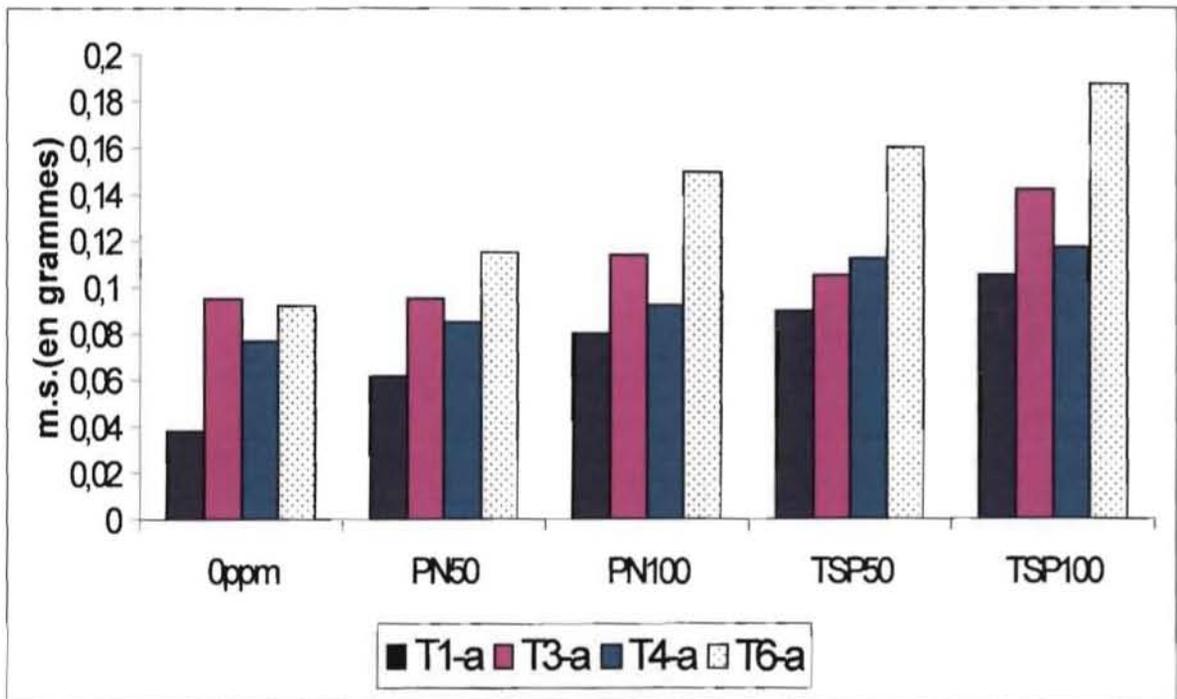


Figure XV : Production de matière sèche à la deuxième coupe.

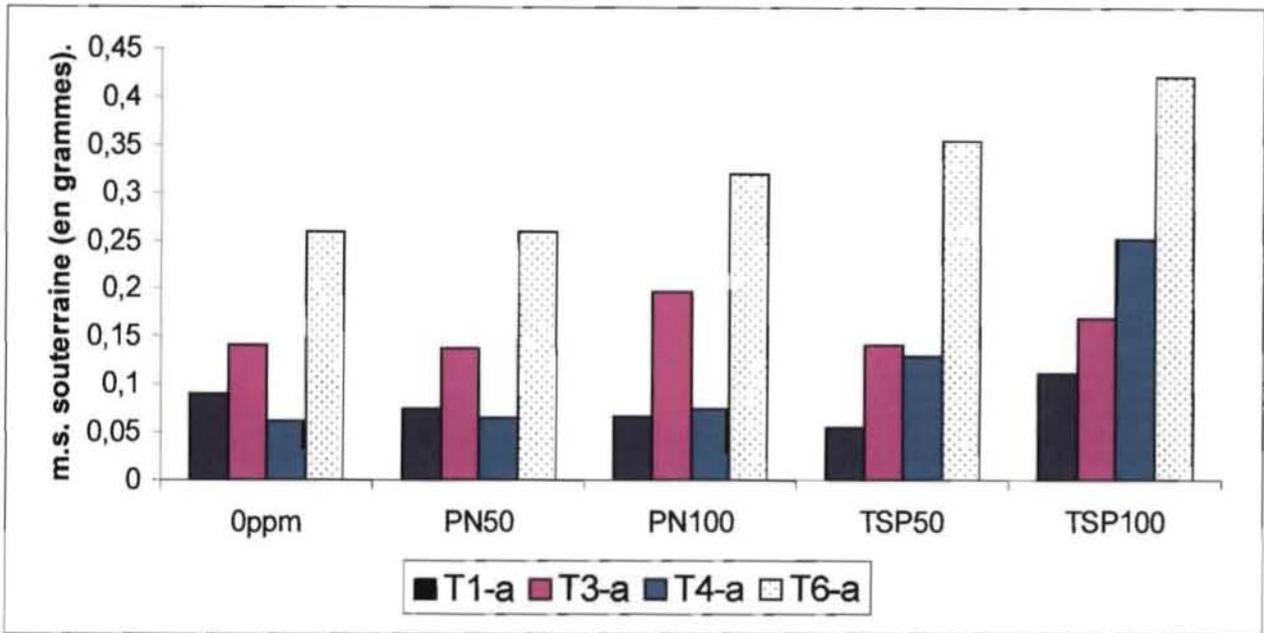


Figure XVI : Production de matière sèche souterraine (racines).

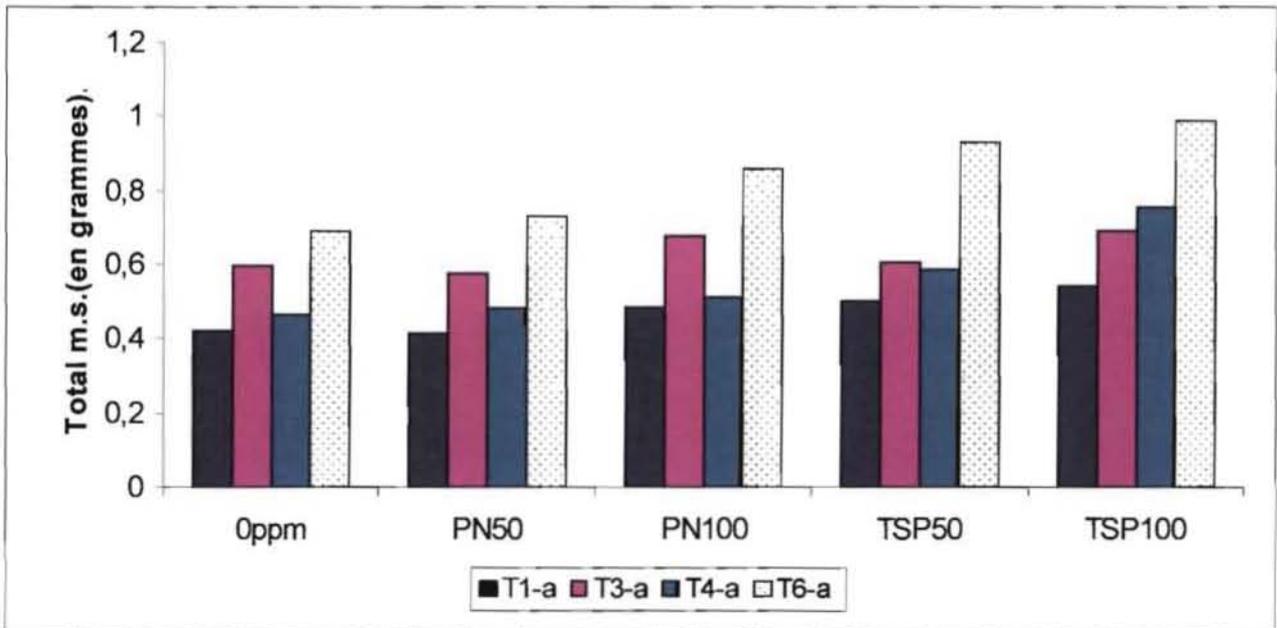


Figure XVII : Production totale de matière sèche (aérienne+souterraine).

#### 4.5.2.2. Effets sur le Phosphore exporté par le sorgho.

Les résultats de phosphore exporté par le Sorgho avec la matière sèche aérienne et souterraine sont regroupés dans le tableau en annexe et représentés par les figures XVIII, XIX, XX et XXI.

##### a) 1<sup>ère</sup> coupe (figure XVIII).

D'une manière générale, les plus grandes quantités de phosphore exporté ont été enregistrés avec le Phosphate Super Triple à la dose de 100 ppm sur tous les traitements. Aussi, les traitements sans apport phosphaté (0ppm) accusent en général les plus faibles quantités de phosphore exporté. Les traitements avec apport de phosphate naturel (PN50 et PN100) améliorent la nutrition phosphatée des plantes par rapport aux traitements avec 0ppm. Pour cette coupe, le FM avec le TSP à 100ppm a la plus grande quantité de phosphore exporté.

##### b) 2<sup>ème</sup> coupe (figure XIX).

Les valeurs sont plus faibles par rapport à celles de la première . Cela s'explique par la faible quantité de matière sèche récoltée lors de cette coupe à cause du dessèchement des plantes. Mais dans l'ensemble, les traitements avec le TSP ont les valeurs de phosphore exporté les plus élevées . Les traitements ayant bénéficié du phosphate naturel améliorent aussi pendant cette coupe la nutrition phosphatée des plantes par rapport aux traitements avec 0ppm.

A cette coupe c'est le traitement FM avec TSP100 qui a la plus forte quantité de phosphore exporté, suivi de fmo à TSP100.

##### c) Racines (figure XX)

Avec la matière sèche souterraine, on note des quantités de phosphore dans l'ensemble faibles. En général, toujours les traitements avec apport de TSP100 ont les meilleures nutritons phosphatées des racines.

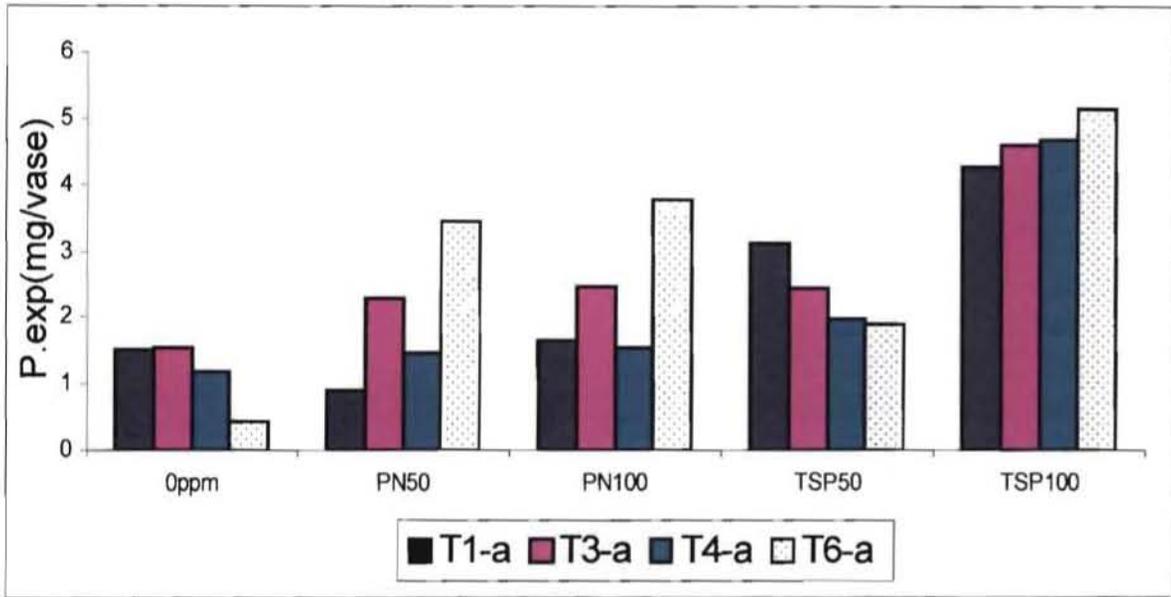


Figure XVIII : Le phosphore exporté à la première coupe.

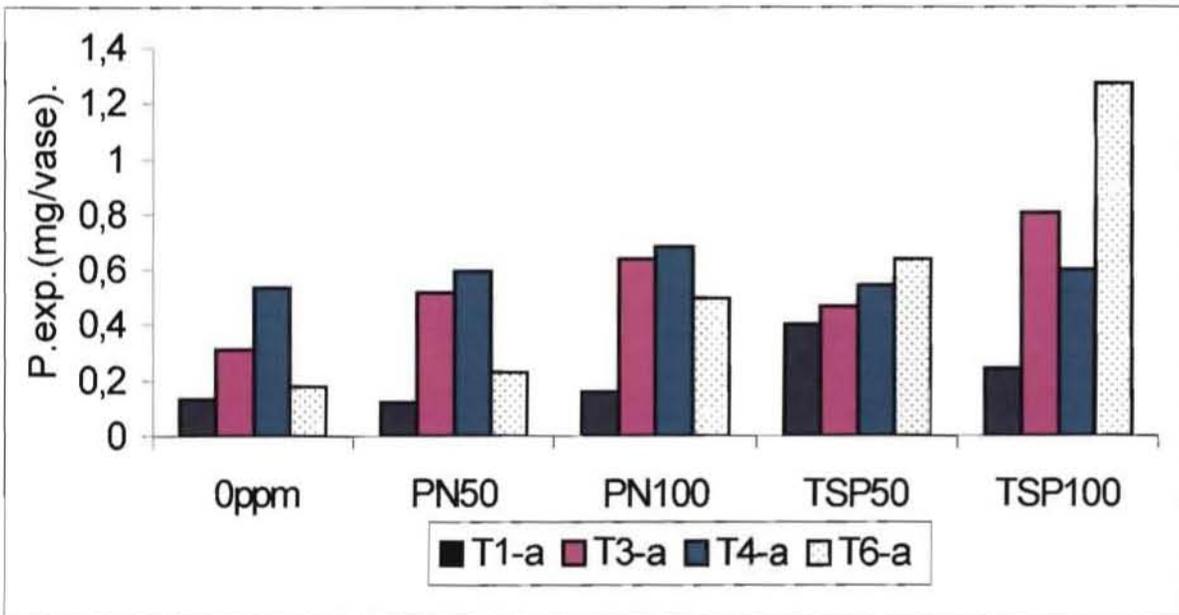


Figure XIX : Phosphore exporté à la deuxième coupe.

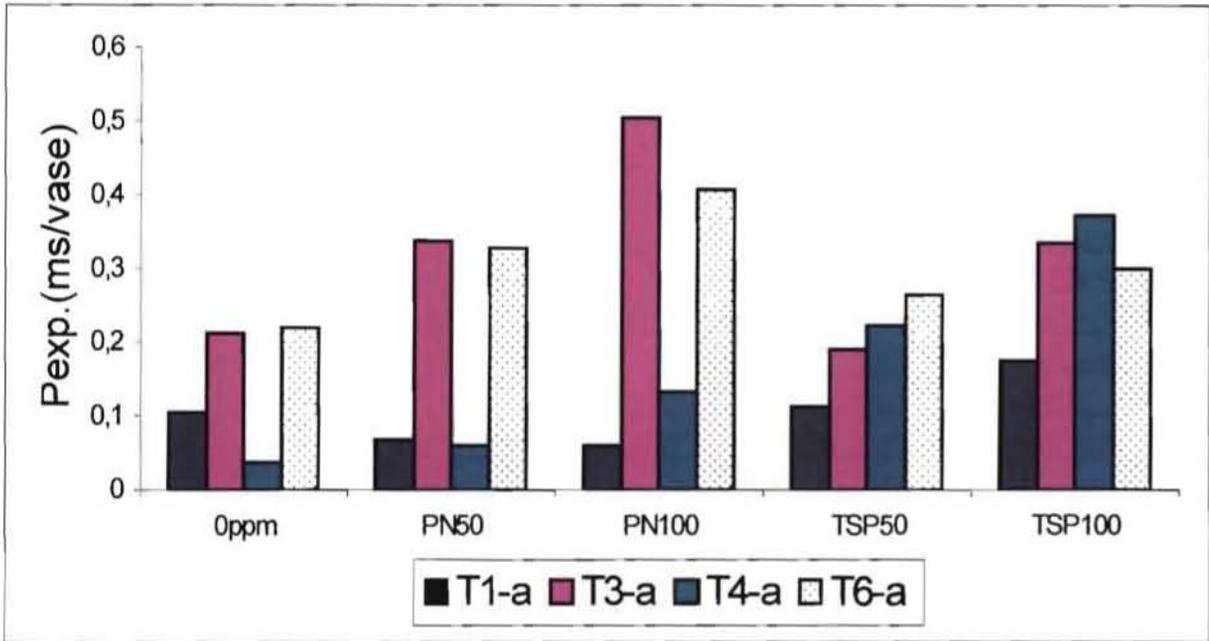


Figure XX : Le phosphore exporté dans les racines.

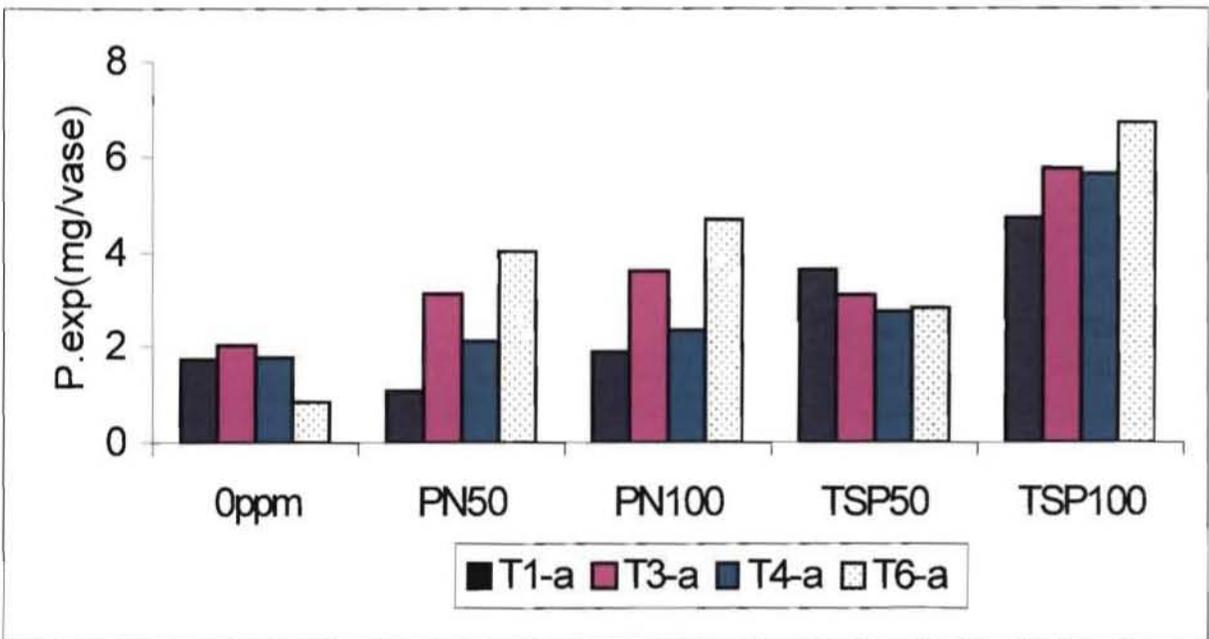


Figure XXI : Le phosphore total exporté.

#### 4.5.2.3.. Efficacité relative du phosphate naturel.

Au cours de cet essai en vase de végétation, deux doses de phosphate naturel( 50 et 100 ppm de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) ont été utilisées.

On peut définir une valeur relative de l'assimilabilité d'un élément contenu dans un engrais appelé « Efficacité Relative » (E.R) par rapport au même élément présent dans un autre constituant pris comme référence, en comparant l'effet des deux constituants sur une variable biologique ou physico-chimique du système . Cette variable peut être soit le rendement en matière sèche, soit la quantité de l'élément prélevé (MOREL et FARDEAU,1988 ; cités par KOMARUDDIN I.,1996).

Pour calculer la valeur de l'efficacité relative du phosphate naturel, on peut utiliser les facteurs TSP : les efficacités relatives peuvent être ER<sub>I</sub> et ER<sub>II</sub> avec :

I : indice I se rapportant à la matière sèche ;

II : indice II se rapportant au prélèvement net de phosphore.

$$ER_I = \frac{MS(PN) - MS(T)}{MS(X) - MS(T)}$$

$$ER_{II} = \frac{P_{exp.}(PN) - P_{exp.}(T)}{P_{exp.}(X) - P_{exp.}(T)}$$

Avec :

M.S : matière sèche

PN :Phosphate Naturel

T : Témoin ( il s'agit ici de 0 ppm de P)

X : engrais étalon (TSP100)

Ici, nous avons pris le phosphate naturel à 100 ppm (PN100) et la dose équivalente pour le TSP( TSP100) comme engrais de référence. Rappelons que nous avons pris la matière sèche totale produite dans chaque traitement et également le phosphore exporté total.

Les résultats sont rassemblés dans le tableau 16.

### Résultats

Tableau 16 : Efficacité relative du phosphate naturel.

Traitements	ER <sub>I</sub> (%)	ER <sub>II</sub> (%)
T1-a	52.82	4.26
T3-a	86.17	42.06
T4-a	15.91	15.51
T6-a	57.04	65.53

En terme de résultats, l'efficacité relative du phosphate naturel (Burkina Phosphate) à 100 ppm par rapport au TSP à la même dose, donne 52% en ce qui concerne la production de matière sèche et seulement 4.26% pour l'exportation du phosphore au niveau du traitement témoin .

Pour fmo, l'efficacité relative du phosphate naturel à 100ppm par rapport à TSP100 est très bonne pour la production de matière sèche (86%) et assez bonne pour l'exportation du phosphore(42%).

Quant au traitement fm, les efficacités relatives sont moindres par rapport à fmo : elles sont de15% pour la production de matière sèche et le phosphore exporté.

Enfin, le traitement FM donne des efficacités relatives moyennes de 57% pour la matière sèche et 65% pour l'exportation du phosphore

#### 4.5.2.4. Discussion-conclusion

##### Sur la production de matière sèche

Les analyses statistiques qui révèlent des différences non significatives entre les traitements et une différence hautement significative entre les facteurs, se trouvent en annexe.

Les résultats de production de matière sèche donnent une large suprématie du super triple phosphate à 100 ppm sur les autres facteurs dans tous les traitements. Cela met en évidence le faible niveau de phosphore des sols ferrugineux et la capacité du TSP à alimenter les plantes dès son application. Ces résultats rejoignent ceux de BAZIE (1984), de BADO (1985), de LOMPO (1989 et 1993), de KOMMARUDIN I. (1990), et de COMPAORE (1996).

Au niveau des traitements, celui de la fumure minérale forte vient en tête et met en évidence la solubilité des engrais minéraux et la disponibilité des éléments minéraux dans la solution du sol après les apports de ces engrais surtout à forte dose ; l'action des engrais minéraux à forte dose s'est fait sentir dès la première coupe et confirme davantage la solubilité rapide de ces engrais dans la solution du sol.

Le traitement fmo, malgré son apport organo-minéral faible a donné une production de matière sèche dont l'importance en terme de quantité vient après FM ; cela permet de mettre en évidence l'effet de la combinaison matière organique-engrais minéraux sur l'alimentation des cultures. En effet des travaux de SEDOGO(1981) ont montré l'effet des engrais minéraux sur la minéralisation de la matière organique et permet de mettre de manière progressive à la disposition des cultures les éléments minéraux indispensables. La réalisation des 4 coupes nous aurait permis de situer l'importance du fumier associé à la fumure minérale sur l'alimentation des cultures en éléments minéraux sur une période de plus ou moins longue durée.

La quantité de matière sèche produite par fm étant voisine du témoin montre l'effet limité de la fumure minérale faible sur la production.

##### Sur le phosphore exporté par les plants

Les quantités de phosphore exporté, comme dans la production de matière sèche, donnent une nette domination des traitements avec TSP à 100 ppm sur les autres facteurs ; ceci permet inéluctablement de confirmer que le super triple phosphate, par sa solubilisation facile, met à la disposition des cultures du phosphore assimilable dans la solution du sol,

aussitôt après son incorporation. Le Burkina Phosphate(BP), surtout à 100ppm donnent des résultats qui prouvent que cette source phosphatée locale, améliore la nutrition phosphatée des cultures . L'importance de cette alimentation phosphorique des cultures se ressent surtout dans les traitements FM et fmo. En effet, l'acidité du sol du traitement FM a un effet sur la solubilisation et l'assimilation des phosphates naturels ; fmo par ses acides organiques(acide carbonique, acides humiques, etc.) produits par la minéralisation du fumier, facilite également la solubilisation des phosphates naturels.

Si l'essai en vase de végétation était arrivé à terme, on aurait pu mesurer l'évolution du phosphore exporté dans le temps au niveau des traitements ayant bénéficié des phosphates naturels ; mais malgré les quatre semaines de l'essai, des résultats mettent en exergue, l'importance des phosphates naturels sur l'alimentation des cultures avec certaines techniques culturales.

#### Sur l'efficacité relative des phosphates naturels.

L'expérimentation qui a été conduite, montre que les phosphates naturels du Burkina, comparativement au TSP , a une efficacité agronomique, révélée par la plante test le *Sorghum almum*. tant sur le plan de la production de matière sèche que de phosphore exporté.

Cette efficacité agronomique est d'autant plus perçue, que le Burkina Phosphate, dosé à 100 ppm est incorporé au sol en combinaison avec la fumure organo-minérale faible au moins ; cet apport organo-minérale facilite la solubilisation du Burkina-Phosphate et l'absorption des ions phosphatés par les plantes.

## CONCLUSION GENERALE.

La faible quantité de minéraux assimilables dans les sols acides reste l'un des problèmes majeurs pour la mise en valeur des sols tropicaux ; tel est le cas de nombreux sols au Burkina Faso. Ces sols qui appartiennent à la sous-classe des sols ferrugineux tropicaux souvent lessivés, couvrent 39% environ des terres cultivables au Burkina Faso. Leur production agricole est tributaire de la correction à la fois de la forte déficience en phosphore et les effets néfastes de l'excès d'aluminium induit par leur forte acidité.

L'objectif de notre étude au départ était de cerner les effets de quelques méthodes de fertilisation et de rotations culturales sur le statut du phosphore dans les sols cultivés et d'en dégager celles susceptibles de mettre à la disposition des cultures du phosphore assimilable pour leur meilleur développement. Cette étude dont le support a été un dispositif de longue durée sis à Saria, notamment l'essai entretien de la fertilité, est partie de quatre traitements ayant bénéficié de différents apports de fertilisants : Témoin absolu sans engrais, fumure organo-minérale faible, fumure minérale faible seule et fumure minérale forte seule. Deux séries de rotations culturales ont accompagné notre travail : la culture continue de sorgho et la rotation sorgho/niébé.

Des résultats antérieurs de production, des bilans minéraux théoriques du phosphore et des autres éléments majeurs, des analyses physico-chimiques des sols de l'essai, du fractionnement du phosphore et des essais en vases de végétation réalisés en serre, ont constitué l'essentiel des travaux de cette étude.

A l'issue des travaux réalisés, les conclusions suivantes se dégagent :

-L'évolution des tendances des rendements de sorgho demeure stable au bout d'une quarantaine d'années sur le traitement ayant bénéficié de la fumure organo-minérale faible dans les deux séries de rotations culturales.

-Le traitement fmo détient des valeurs moyennes, voir meilleures quant aux caractéristiques physico-chimiques. Ce traitement échappe à l'apparition de l'aluminium échangeable qui est un indice de l'acidification. Les méthodes d'extraction de phosphore assimilable montrent que ce traitement est la plus fournie en phosphore biodisponible alors que FM détient les plus faibles teneurs.

-Les bilans minéraux théoriques établis montrent que le témoin absolu est déficitaire en phosphore mais également en azote et en potassium dans les deux séries de rotations ; les traitements fmo et FM ont tous des bilans excédentaires en N ,P,et K dans les deux séries.

-Le fractionnement du phosphore place en tête le traitement fmo qui détient les formes de phosphore liées mais facilement échangeables donc facilement accessibles par les cultures ( P-Ca et P-Al). La série c , par l'acidité induite des légumineuses a accru la teneur des sols en phosphore soluble-eau.

-Les essais en vases de végétation, malgré les dessèchements qui n'ont pas permis de réaliser les 4 coupes prévues, ont montré l'importance de la matière sèche produite et du phosphore exporté sur les traitements fmo et FM. Les phosphates naturels ont également montré leur efficacité comparativement au TSP sur ces deux traitements.

Cependant, les résultats obtenus en vases de végétation, devront être confirmés par des expérimentations au champ. Aussi des études économiques sur l'utilisation des fumures organo-minérale faible, minérale faible seule et minérale forte seule, associées au phosphate naturel, seront-elles opportunes pour parvenir à une vulgarisation de techniques culturales plus adaptées. Il est également souhaitable de songer à un chaulage de tous les traitements de l'essai pour réduire le processus d'acidification.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**ANDREW N.,2001.** Innovation management of agricultural phosphorus to protect soil and water resources:1071-1100.

**ARRIVET J., ROOSE E., CARLIER P., 1973.** Etude du ruissellement du drainage et de l'érosion sur des sols ferrugineux de la région Centre de HAUTE- VOLTA( station de Saria).

**ARRIVET J.,1974.** Fertilisation des variétés voltaïques de sorgho sur les sols ferrugineux tropicaux du plateau Mossi. 49p.

**BADO B.,1985.** Amélioration de l'efficacité des phosphates naturels par l'utilisation des matières organiques.Mémoire d'Ingénieur de Développement Rural , IDR, Ouagadougou.124 p.

**BAZIE Y.,1984.** Valorisation des résidus cultureux dans la zone du plateau Mossi. Amélioration de la qualité des composts (station agronomique de Saria).Mémoire d'Ingénieur du Développement Rural, IDR, Université de Ouagadougou.119 p.

**BOYER J., 1982.** Les sols ferrallitiques, facteurs de fertilité et utilisation des sols. 280 p .

**CHOPART J.L., 1994.** Techniques de gestion du sol et l'alimentation hydrique des cultures annuelles tropicales. 57 p.

**CIRAD,GERDAT,URA,1996.** Procédure opérationnelle des sols : Détermination de la CEC et des cations extractibles par la méthode au chlorure de cobaltihexamine :1-15.

**COMPAORE N.E.,1996.** Contribution à la caractérisation et à la gestion de la fertilité phosphatée de quelques sols ferrugineux tropicaux.Thèse de Doctorat ,INPL, NANCY.134 p.

**DARINKA B. , 1999.** Effect of phosphorus fertilization on Zn and Cd contents in soil and corn plants: 49-56. Développement Agricole au sud du Sahara :273-339.

**DUMONT C. , DUPONT de DINECHIN B. ,1967a .** Observation sur la priorité à accorder en vulgarisation à la fumure des céréales de culture sèche en Haute Volta. 12p.

**DUMONT C. , DUPONT de DINECHIN B. ,1967b.** La fumure phosphatée des cultures vivrières en Haute Volta. 21p.

**FIRDAUS, 2001.** Interaction H-Al-P dans la rhizosphère du maïs en sol acide tropical. Thèse de Doctorat , ENSA, MONTPELLIER .101 p.

**GUIRA T . ,1988 .** Intensification de la culture de sorgho en sol ferrugineux .Etude des effets induits des techniques culturales sur la fertilité des sols . Mémoire d'Ingénieur du Développement Rural, IDR, Université de Ouagadougou. 96 p .

**HIEN V.,1990.** Pratiques culturales et évolution de la teneur en azote organique utilisable par les cultures dans un sol ferrallitique du Burkina Faso. Thèse de Doctorat , INPL, NANCY. 148 p.

**ISABELLE P., 1988.** Caractérisation physico-chimique et évolution de l'efficacité agronomique de phosphates naturels bruts ou partiellement acidifiés provenant d'Afrique de l'Ouest .Thèse de Docteur Ingénieur. INPL, NANCY.296 p.

**ISMA, 1977.** Phosphore et Agriculture : l'importance du phosphore en agriculture :109-128.

**IVRAZ/IRAT , 1983.** Synthèse des résultats de Recherches sur les phosphates naturels en Haute Volta de 1976 à 1982. 51p.

**KATALIN D. ,2000 .** Effect of increasing fertilizer doses on the soluble P, Cd, Pb and Cr content of soils:1825-1835.

**KOMMARUDIN I. ,1990.**Utilisation de phosphates naturels indonésiens dans les sols acides : Caractérisation physico-chimique et biologique de 2 minerais phosphatés et d'un amendement calcaire indonésiens en vue de leur application agricole. Thèse de Doctorat , Université de MONTPELIER II.153 p.

**LOMPO F. , 1989.** Effets des phospho-composts sur la dynamique du phosphore assimilable dans quatre sols du Burkina et sur la production de matière sèche du mil (*Pennissetum glaucum*) . D.E.A., FAST, ABIDJAN, 94 pp.

**LOMPO F. , 1993.** Contribution à la valorisation des phosphates naturels du Burkina Faso: Etudes des effets de l'interaction phosphates naturels- matière organique. Thèse de Docteur Ingénieur, FAST , ABIDJAN . 226 p.

**LOMPO F., SEDOGO M.P. , HIEN V., 1994.** Application directe du phosphate naturel du Burkina Faso. 50 pp.

**LUTZ J.F., 1966.** Effect of phosphorus on some physical properties of soils : water retention : 433-437.

**PEZZAROSSA B., 1993.** Effects of repeated phosphate fertilization on the headly metal accumulation in soil and plants under protected cultivation:2307-2319.

**DELVIGNE L.D.,1996.** Gérer la fertilité des terres dans les pays du sahel. 397 p.

**PICHOT J.L. , SEDOGO M.P., POULAIN J.F., ARRIVET J., 1981 .** Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence des fumures minérale et organique . L'agronomie tropicale, 36(2) : 122-133.

**PIERI C. , 1989.** Fertilité des terres de savanes, bilan de 30 ans de Recherches et de

**ROTHBAUM H.P. , 1979.** Uranium accumulation in soils from long continued applications of phosphates:148-152.

**RUSSEL Y., 1992.** Phosphorus Decision Support System Workshop . 174 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, NANCY.195 p.

**SEDOGO M.P., 1993.** Evolution des sols ferrugineux lessivés sous cultures : incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse de Doctorat Es- Sciences, FAST , ABIDJAN. 295 p.

**SHARPLEY A.N. , MENZEL R.G., 1993.** The impact of soil and fertilizer phosphorus on the environment:297-324.

**SOLTNER D., 1994.** Les bases de la production végétale- TOME 1 : le sol. 467 p.

**TRUONG B.,1989.**Evaluation de l'efficacité agronomique des phosphates naturels provenant d'Afrique de l'Ouest. Thèse de doctorat, INPL, NANCY.133p.

**WILLIAMS C. H., DAVID D.J., 1974.** The accumulation in soil of residues from phosphates fertilizers and their effect on the cadmium content of plants:86-93.

**WORL BANK, IFDC, ICRAF,1994.** Feasibility of phosphate rock use as a capital investment in sub-Saharan African, issues and opportunities. 79p.

**ZERBO L.,1995.** Caractérisation des sols des stations de Recherches agricoles de l'INERA : KAMBOINSE, FARAKOBA, SARIA , NIANGOLOKO.Rapport d'étude. 114 p.

**ANNEXE 1 : Production de matière sèche du sorgho fourrager à l'essai-test en vases de végétation(en gramme/vase).**

	Facteurs	R1	R2	R3	R4	MOYENNE
1ère coupe	Oppm deP	0,25	0,3	0,26	0,24	0,2625
	PN 50	0,26	0,33	0,22	0,2	0,2525
	PN 100	0,26	0,26	0,17	0,31	0,25
	TSP 50	0,29	0,36	0,29	0,29	0,3075
	TSP 100	0,32	0,26	0,24	0,24	0,265
2ème coupe	Oppmde P	0,24	0,26	0,24	0,18	0,23
	PN 50	0,25	0,29	0,24	0,26	0,26
	PN 100	0,18	0,24	0,16	0,24	0,205
	TSP 50	0,27	0,32	0,27	0,27	0,2825
	TSP 100	0,32	0,29	0,37	0,33	0,3275
3ème coupe	OppmdeP	0,06	0,13	0,07	0,07	0,0825
	PN 50	0,14	0,13	0,12	0,12	0,1275
	PN 100	0,17	0,18	0,17	0,17	0,1725
	TSP50	0,27	0,23	0,16	0,15	0,2025
	TSP 100	0,3	0,22	0,22	0,18	0,23
4ème coupe	Oppm deP	0,11	0,1	0,07	0,1	0,095
	PN 50	0,1	0,09	0,1	0,11	0,1
	PN 100	0,11	0,11	0,11	0,14	0,1175
	TSP 50	0,16	0,11	0,1	0,08	0,1125
	TSP 100	0,2	0,2	0,15	0,14	0,1725

Pcf<0.001 avec Pcf=Probabilité liée aux facteurs et aux coupes.

R1 : répétition 1  
R2 : répétition 2  
R3 : répétition 3  
R4 : répétition 4

ANNEXE 2 : Production de matière sèche du fonio à l'essai test en vases (en g/vase).

COUPES	FACTEURS	R1	R2	R3	R4	MOYENNES
1ère coupe	OP	0,16	0,2	0,15	0,11	0,155
	PN50	0,11	0,14	0,18	0,14	0,1425
	PN100	0,1	0,15	0,13	0,1	0,12
	TSP50	0,11	0,18	0,1	0,2	0,1475
	TSP100	0,16	0,23	0,21	0,2	0,2
2ème coupe	OP	0,2	0,17	0,18	0,16	0,1775
	PN50	0,21	0,17	0,13	0,14	0,1625
	PN100	0,2	0,27	0,14	0,15	0,19
	TSP50	0,33	0,21	0,2	0,22	0,24
	TSP100	0,17	0,21	0,23	0,2	0,2025
3ème coupe	OP	0,09	0,06	0,12	0,05	0,08
	PN50	0,08	0,07	0,11	0,07	0,0825
	PN100	0,04	0,11	0,06	0,08	0,0725
	TSP50	0,17	0,14	0,15	0,11	0,1425
	TSP100	0,19	0,18	0,17	0,11	0,1625
4ème coupe	OP	0,05	0,05	0,06	0,06	0,055
	PN50	0,03	0,03	0,08	0,04	0,045
	PN100	0,05	0,04	0,05	0,05	0,0475
	TSP50	0,06	0,06	0,07	0,08	0,0675
	TSP100	0,11	0,07	0,07	0,05	0,075

Avec  $P_{cf} < 0.001$

ANNEXE 3: Production de matière sèche du mil à l'essai test en vases (en g/vase).

COUPES	FACTEURS	R1	R2	R3	R4	MOYENNES
1ère coupe	OP	0,25	0,16	0,19	0,31	0,2275
	PN50	0,19	0,3	0,15	0,19	0,2075
	PN100	0,27	0,27	0,21	0,19	0,235
	TSP50	0,28	0,32	0,32	0,29	0,3025
	TSP100	0,35	0,28	0,33	0,29	0,3125
2ème coupe	OP	0,17	0,16	0,1	0,16	0,1475
	PN50	0,11	0,13	0,13	0,15	0,13
	PN100	0,18	0,16	0,15	0,12	0,1525
	TSP50	0,16	0,17	0,15	0,21	0,1725
	TSP100	0,57	0,18	0,53	0,18	0,365
3ème coupe	OP	0,07	0,08	0,08	0,09	0,08
	PN50	0,07	0,1	0,08	0,09	0,085
	PN100	0,11	0,09	0,09	0,09	0,095
	TSP50	0,07	0,13	0,11	0,1	0,1025
	TSP100	0,13	0,11	0,1	0,1	0,11

$P_{cf} < 0.001$

Probabilité entre espèces  $< 0.001$

ANNEXE 4 : Production de sorgho (en kg/ha) de la série a

Année	Témoïn	fmo	fm	FM
1960	1660	1600	1230	1230
1961	180	840	560	660
1962	180	372	380	380
1963	180	552	400	870
1964	180	544	340	650
1965	330	1200	710	1690
1966	185	1300	778	1469
1967	60	1460	380	680
1968	80	970	470	814
1969	140	1800	870	900
1970	170	2140	1380	2010
1971	150	2115	785	1015
1972	150	1432	978	864
1973	232	1270	600	599
1974	33	2294	678	479
1975	54	2442	248	345
1976	11	917	146	31
1977	62	516	62	15
1978	7	627	81	151
1979	275	1523	1069	1768
1980	83	1386	533	929
1981	359	1961	1140	1150
1982	276	1652	1026	1416
1983	518	1395	1385	1702
1984	500	2021	1630	1442
1985	347	1199	749	1042
1986	275	1602	295	667
1987	486	1466	1071	554
1988	789	2217	1505	2440
1989	240	1061	830	1014
1990	518	1622	1235	1118
1991	1163	2596	2358	2589
1992	399	1014	652	1126
1993	650	2231	1967	1772
1994	357	2269	1339	1649
1995	553	2093	1364	1352
1996	469	1404	779	866
1997	766	1895	1463	1627
1998	89	816	102	439
1999	528	1036	962	831
2000	275	875	1086	688
2001	124	320	424	412

ANNEXE 5: Production de sorgho ( en kg/ha) de la série c.

Année	Témoin	fmo	fm	FM
1960	660	1600	1230	1230
1961	180	840	560	660
1962	180	372	380	380
1963	180	552	400	870
1964	180	544	340	650
1966	283	1318	864	1514
1968	151	1715	738	997
1970	280	2660	1790	2190
1972	123	1343	841	1059
1974	90	3068	1460	1095
1976	24	1753	435	256
1978	62	1450	451	602
1980	398	2978	2194	2712
1982	504	2161	1811	1873
1984	569	2859	2186	2543
1986	236	2057	875	1052
1988	1215	3493	2976	3336
1990	650	1798	1756	1887
1992	823	2614	2016	2773
1994	1143	3331	2884	3053
1996	861	2609	2034	2545
1998	283	2130	774	957
2000	384	1719	1595	1555

ANNEXE 6: Evolution des tendances de la production de niébé de la série c(en kg/ha).

Années	Témoin	fmo	fm	FM
1975	723	1926	1514	1926
1977	591	1760	1469	1723
1979	633	1563	1414	1600
1981	693	1767	1564	1711
1983	782	1867	1733	1989
1985	784	1872	1794	1971
1987	705	1650	1597	1738
1989	634	1521	1465	1606
1991	602	1457	1390	1524
1993	546	1327	1260	1393
1995	517	1261	1214	1314
1997	509	1226	1194	1282
1999	521	1205	1165	1241
2001	498	1163	1117	1181

ANNEXE 7: Production de niébé kg/ha de la série c.

Année	Témoin	fmo	fm	FM
1975	723	1926	1514	1926
1977	459	1595	1425	1521
1979	717	1169	1304	1354
1981	873	2377	2012	2044
1983	1137	2270	2413	3103
1985	797	1897	2100	1878
1987	230	315	415	344
1989	136	620	539	683
1991	348	945	788	867
1993	40	156	95	207
1995	232	606	747	532
1997	417	844	976	931
1999	662	944	814	744
2001	205	625	495	401

ANNEXE 8: Production de gousses d'arachide (en kg/ha) de la série c(1965-1973).

Année	Témoin	fmo	fm	FM
1965	642	1830	1185	1059
1967	335	629	441	497
1969	574	1341	985	1360
1971	850	1085	1050	1030
1973	745	1281	1410	1532

ANNEXE 9 : Evolution des tendances de la production de sorgho de la série a (en kg/ha).

Années	Témoin	fmo	fm	FM
1960	1660	1600	1230	1230
1961	980	1220	895	945
1962	673	937	723	756
1963	550	841	642	785
1964	476	781	582	758
1965	451	851	603	913
1966	413	915	628	993
1967	369	983	597	953
1968	337	982	583	938
1969	317	1064	612	934
1970	304	1161	681	1032
1971	291	1241	690	1030
1972	280	1255	712	1018
1973	277	1256	704	988
1974	260	1325	702	954
1975	248	1395	674	916
1976	234	1367	643	864
1977	224	1320	611	817
1978	213	1284	583	781
1979	216	1296	607	831
1980	210	1300	604	835
1981	216	1330	628	850
1982	219	1344	645	874
1983	231	1346	676	909
1984	242	1373	714	930
1985	246	1366	715	934
1986	247	1375	700	925
1987	256	1378	713	911
1988	274	1407	740	964
1989	273	1396	743	966
1990	281	1403	759	971
1991	308	1440	809	1021
1992	311	1427	804	1024
1993	321	1451	839	1046
1994	322	1474	853	1064
1995	328	1491	867	1072
1996	332	1489	865	1066
1997	344	1500	880	1081
1998	337	1482	861	1064
1999	342	1471	863	1058
2000	340	1456	868	1049
2001	335	1429	858	1034

ANNEXE 10: Evolution des tendances de la production de sorgho de la série c(en kg/ha).

Années	Témoin	fmo	fm	FM
1960	1660	1600	1230	1230
1961	920	1220	895	945
1962	673	937	723	756
1963	550	841	642	785
1964	476	781	582	758
1966	444	871	629	884
1968	402	991	644	900
1970	387	1200	788	1061
1972	357	1216	793	1061
1974	331	1401	860	1064
1976	303	1433	821	991
1978	283	1434	791	958
1980	291	1553	898	1093
1982	307	1597	964	1149
1984	324	1681	1045	1242
1986	319	1704	1034	1230
1988	371	1809	1149	1354
1990	387	1809	1182	1383
1992	410	1851	1226	1457
1994	446	1925	1309	1536
1996	466	1958	1344	1584
1998	458	1965	1318	1556
2000	455	1955	1330	1556

ANNEXE 11 : Production de matière sèche (en grammes/vase).

Traitements	Facteurs	1ère coupe	2ème coupe	Somme des deux 2 coupes	Racines	Total MS
Témoin	Oppm	0,295	0,038	0,333	0,09	0,423
Témoin	PN50	0,275	0,062	0,338	0,075	0,413
Témoin	PN100	0,339	0,08	0,42	0,067	0,487
Témoin	TSP50	0,356	0,09	0,446	0,055	0,501
Témoin	TSP100	0,327	0,105	0,432	0,112	0,544
fmo	Oppm	0,359	0,095	0,454	0,142	0,596
fmo	PN50	0,343	0,095	0,438	0,137	0,575
fmo	PN100	0,366	0,114	0,48	0,197	0,677
fmo	TSP50	0,359	0,105	0,465	0,142	0,607
fmo	TSP100	0,377	0,142	0,52	0,17	0,69
fm	Oppm	0,325	0,077	0,403	0,062	0,465
fm	PN50	0,331	0,085	0,417	0,065	0,482
fm	PN100	0,344	0,092	0,436	0,075	0,511
fm	TSP50	0,343	0,112	0,456	0,13	0,586
fm	TSP100	0,384	0,117	0,502	0,252	0,754
FM	Oppm	0,337	0,092	0,43	0,26	0,69
FM	PN50	0,357	0,115	0,472	0,26	0,732
FM	PN100	0,39	0,15	0,54	0,32	0,86
FM	TSP50	0,417	0,16	0,577	0,355	0,932
FM	TSP100	0,379	0,187	0,566	0,422	0,988

Probabilité <0.001 pour les facteurs et probabilité=0.907 pour les traitements.

ANNEXE 12: Exportation du phosphore par le sorgho.(en mg/vase).

Traitements	facteurs	1 <sup>ère</sup> coupe	2 <sup>ème</sup> coupe	racines	Cumul Pex
Témoin	0ppm	1,51	0,134	0,105	1,749
Témoin	PN50	0,899	0,12	0,067	1,086
Témoin	PN100	1,655	0,16	0,06	1,875
Témoin	TSP50	3,11	0,404	0,113	3,627
Témoin	TSP100	4,285	0,245	0,176	4,706
fmo	0ppm	1,536	0,313	0,212	2,061
fmo	PN50	2,286	0,515	0,338	3,139
fmo	PN100	2,468	0,639	0,505	3,612
fmo	TSP50	2,452	0,467	0,19	3,109
fmo	TSP100	4,605	0,808	0,335	5,748
fm	0ppm	1,186	0,535	0,038	1,759
fm	PN50	1,458	0,595	0,059	2,112
fm	PN100	1,547	0,684	0,132	2,363
fm	TSP50	1,995	0,545	0,223	2,763
fm	TSP100	4,675	0,604	0,373	5,652
FM	0ppm	0,439	0,177	0,22	0,836
FM	PN50	3,458	0,23	0,327	4,015
FM	PN100	3,78378	0,497	0,408	4,689
FM	TSP50	1,914	0,641	0,264	2,819
FM	TSP100	5,144	1,271	0,3	6,715

P.ex : Phosphore exporté.