



# LES CAHIERS DE L'ECONOMIE RURALE

Revue d'Economie Rurale – Revue Semestrielle – n°13 Juillet-Décembre 2011 – ISSN 1987-0000

n°13

- Promotion au champ, de la croissance, l'absorption du phosphore et le rendement de maïs (*Zea mays*) par les souches de *Bacillus* isolées des sols du Mali et solubilisant le Phosphate Naturel de Tilemsi** 1
- Recherche des causes et méthodes de lutte contre le phénomène de dessèchement du riz dans l'eau dans les zones rizicoles de l'Office Riz de Mopti** 23
- Effet des systèmes de culture de légumes sur la teneur en carbone organique du sol en agriculture urbaine et périurbaine à Sikasso** 38
- Une expérience participative d'usage de la modélisation avec les paysans pour analyser la dynamique de la biodiversité des mils et sorghos dans les systèmes semenciers au Mali - Le cas de l'atelier final du projet IMAS (ANR 2008-2012) : 16-19/01/2012** 47
- Variabilité climatique et son impact sur le régime hydrologique dans le delta central du Niger** 58
- Domestication du *Stylosanthes erecta* P. Beauv « Segufali »** 67
- Étude de l'impact de l'intégration agriculture-élevage sur le revenu agricole des exploitations agricoles familiales dans la zone d'encadrement de l'Office de la Haute Vallée du Niger (OHVN) : Cas de 3 villages de la Commune rurale de Ouélessébougou (Mali)** 78





# **LES CAHIERS DE L'ÉCONOMIE RURALE**

---

**N° 13 – Juillet-Décembre 2011**

---

**Revue scientifique de l'Institut d'Économie Rurale (IER)**

**Fax : (223) 20 23 37 75 – Tél. : (223) 20 22 26 06 / 20 23 19 05**

**B.P. 258 – Rue Mohamed V – Bamako, Mali**



---

## LES CAHIERS DE L'ÉCONOMIE RURALE

Revue scientifique de l'Institut d'Économie Rurale (IER)

Fax : (223) 20 23 37 75 – Tél. : (223) 20 22 26 06 / 20 23 19 05

B.P. 258 – Rue Mohamed V – Bamako, Mali

---

**Directeur de publication :** Dr Aly Kouriba  
**Éditeur Scientifique :** Dr Samba Soumaré  
**Secrétaire de rédaction :** Dr Lassine Diarra

---

### Comité de rédaction

Pr Daniel Dansonko, IPR/IFRA Katibougou  
Dr Tiéma Niaré, Université de Marseille  
Dr Pierre Hiernaux, CESBIO, Toulouse  
Dr Kalifa Sanogo, PNUD, Bamako  
Dr Mamadou D. Coulibaly, DNPIA, Bamako  
Dr Mike Bertelsen, Virginia Tech  
Dr Peter White, Washington State University  
Dr Oumar Niangado, Fondation Syngenta  
Pr Siaka Sidibé, Hôpital du Point G, Bamako  
Pr N'Golo Diarra, INSFRA, Bamako  
Pr Alhousseini Bretaudeau, CILSS, Ouagadougou  
Pr Aly Yéro Maïga, CNRST, Bamako  
Dr Niamoye Yaro, Institut d'Économie Rurale, Bamako  
Dr Abdou Yéya Maïga, Institut d'Économie Rurale, Bamako  
Dr Abdoul Karim Traoré, Institut d'Économie Rurale, Bamako  
Dr Abdoulaye Hamadoun, Institut d'Économie Rurale, Bamako  
Dr Amadou Kodio, Institut d'Économie Rurale, Bamako

### Comité scientifique

Dr Aly Kouriba, Institut d'Économie Rurale, Bamako  
Dr Lassine Diarra, Institut d'Économie Rurale, Bamako  
Dr Modibo Sidibé, Institut d'Économie Rurale, Bamako  
Dr Bara Ouologuem, Institut d'Économie Rurale, Bamako  
Dr Ibrahima N'Diaye, Institut d'Économie Rurale, Bamako  
Dr Gaoussou Traoré, Institut d'Économie Rurale, Bamako  
Dr Zana Sanogo, Ministère de l'Agriculture, Bamako

# INFORMATIONS ET INSTRUCTIONS AUX AUTEURS

Créée en 2003 au sein de l'Institut d'Économie Rurale, la revue « *LES CAHIERS DE L'ÉCONOMIE RURALE* » est une revue scientifique qui publie deux fois par an, en français et en anglais, les résultats de travaux originaux de recherche effectués par les chercheurs de l'IER ou en collaboration avec divers partenaires. Les propositions doivent relever des domaines suivants : productions végétales, productions animales, productions forestières, productions halieutiques, systèmes de production et économie des filières, etc. Les articles proposés par d'autres chercheurs sont également admis lorsque leur qualité scientifique est reconnue. Le Comité éditorial, en collaboration avec un réseau de lecteurs, assure la sélection des articles.

## I. Généralités

### 1. Manuscrit

Le manuscrit est saisi sur ordinateurs (en interligne 1.5) et imprimé sur papier de format 21 cm x 29.7 cm avec une marge de 4 cm à droite comme à gauche, sans rature ni surcharge. Sa longueur ne doit pas dépasser 15 pages, y compris les illustrations et les tableaux.

Le manuscrit soumis en trois exemplaires, ainsi que la version électronique, doivent être envoyés à l'adresse suivante : Dr Lassine Diarra, Éditeur scientifique, BDIP IER, B.P. 258, Bamako, Mali. Email : [lassine.diarra@ier.ml](mailto:lassine.diarra@ier.ml)

### 2. Style

Le style doit être simple et concis, avec des phrases courtes, du type : sujet, verbe, complément. Les noms scientifiques de genres et d'espèces, doivent être écrits en italique et seront suivis du nom du descripteur, à la première apparition dans le texte. Par la suite, le nom du descripteur sera occulté.

Lorsque dans une citation, la référence des auteurs comporte plus de deux noms, seul le nom du premier auteur est mentionné et il est suivi de « et al. » écrit en italique.

### 3. Notes en bas de page

Excepté les adresses des auteurs à la première page, les notes en bas de pages ne sont pas admises.

### 4. Pagination

Les numéros de pages, en chiffres arabes, seront portés en haut et au centre de la page.

### 5. Unités de mesure

Elles seront du système international et devront être cohérentes dans le texte.

### 6. Procédure d'évaluation des manuscrits

Les manuscrits seront évalués, dans le cadre d'un réseau de lecteurs, par au moins trois lecteurs. En cas de litige, l'avis d'un quatrième lecteur sera sollicité.

Au besoin, les auteurs reçoivent les commentaires écrits des référés, donc le texte à corriger. Le document corrigé doit être retourné à l'Éditeur scientifique dans un délai d'un mois, à partir de la date d'expédition par l'expéditeur.

Les manuscrits refusés seront retournés à leurs auteurs et la raison sera signifiée par écrit.

## **7. Corrections des mises en page**

Les premières mises en page faites par l'éditeur vous seront envoyées et vous devrez consulter cette réalisation avec beaucoup de soins, de façon à relever toutes les corrections et rectifications à y apporter. Il n'est pas question de modifier le document. Le manuscrit devra ensuite être retourné, dans les meilleurs délais au Secrétariat de rédaction de la revue.

## **8. Tirés à part**

Un seul tiré à part sera transmis gracieusement à chaque auteur ou coauteur. D'autres tirés à part pourront être obtenus contre paiement d'un montant qui sera fixé lors de l'expédition de l'exemplaire gratuit.

## **II. Organisation du manuscrit**

### **1. Première page**

La première page doit comporter le titre en français et en anglais de l'article, le nom et le prénom du ou des auteurs, les adresses complètes de leurs institutions d'affiliation. En bas de page, on précisera les adresses postale et électronique si possible, les numéros de téléphone et le fax de l'auteur à qui doivent être envoyées les correspondances.

Cette page contiendra également un résumé en français et un résumé en anglais plus substantiel dans le cas d'un manuscrit en français et inversement. Chaque résumé ne devra pas dépasser 200 mots et sera suivi de 3 à 6 mots clés ; il permettra de comprendre la justification, la méthodologie, les résultats et les conclusions. Dans le corps du texte, la numérotation des titres et sous titres se fera selon la norme internationale (1., 1.1., 1.1.1, etc.).

### **2. Introduction**

Elle doit situer le contexte de l'étude par rapport aux travaux antérieurs effectués dans le domaine.

## **3. Matériel et méthodes**

Seul le matériel original sera décrit. Évitez les longues listes de matériels communément utilisés tels que sécateur, bottes, etc.

Si les méthodes habituellement utilisées doivent être succinctement décrites, les méthodes nouvelles, par contre, doivent être détaillées.

## **4. Résultats**

Ils seront rendus sous forme de texte, de tableaux et/ou de figures. Le même résultat ne doit pas être présenté de façon répétitive, par exemple sous forme de tableau et de figure.

## **5. Discussion**

Elle doit être une analyse des résultats expérimentaux par rapport à d'autres travaux similaires, et non une reprise de la description des résultats.

## **6. Conclusion**

La conclusion devra faire ressortir l'importance des résultats acquis pour les recherches futures. Elle doit être différente du résumé, de la description des résultats et de la discussion.

## **7. Remerciement**

S'ils s'imposent, ils devront être concis et ne pas dépasser cinq lignes.

## **8. Références**

Les références concernent uniquement les auteurs cités dans le texte. Elles sont classées par ordre alphabétique des noms d'auteurs et par ordre d'ancienneté pour un même auteur.

### **- Articles**

Noms et initiales de prénoms du ou des auteurs, année de publication, titre complet de l'article, nom complet du périodique, numéro et volume, les numéros de la première et de la dernière page.

Exemple : TRAORE D., 1981 – La formation du grain de pollen chez les Cypéracées de la tribu des Cypérées, étudiées en Côte d'Ivoire. *Candollea* 36 (2) : 431-444.

#### - Livres

Noms et initiales de prénoms du ou des auteurs, année de publication, titre complet du livre, éditeur, maison et lieu de publication, nombre de pages.

Exemple : BERHAUT J., 1988 – Flore illustrée du Sénégal, Tome IX. Edition Clairafrique, Dakar, Sénégal, 523 pages

#### - Thèses

Noms et initiales de prénoms de l'auteur, année de publication, titre complet de la thèse, spécialité, Université, ville et pays, nombre de pages.

Exemple : TRAORE N'G., 1998. Influence de l'exploitation forestière sur la végétation et la flore du Baoulé. Thèse de Doctorat du 3<sup>ème</sup> cycle. Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 150 pages.

#### - Communications

Noms et initiales de prénoms du ou des auteurs, année de publication, titre complet de la communication, éditeurs, titre du forum scientifique (congrès, séminaire, symposium) date et lieu, les numéros

de la première et de la dernière page. Exemple : CISSE M., 1982. Évaluation du potentiel fourrage de la zone d'étude du projet CIPEA. In Actes du Colloque sur les ligneux fourragers. Addis-Abeba, Éthiopie. 154-169.

#### 9. Liste des taxons végétaux cités

À la fin de chaque article, une liste des taxons végétaux cités sera donnée, en suivant l'ordre alphabétique des noms actualisés des espèces. Le nom du descripteur sera obligatoirement mentionné. La famille de chaque espèce doit être précisée.

#### 10. Illustrations

Elles seront toutes appelées dans le texte. Les figures (dessin, courbes, histogrammes, cartes, photographies) seront numérotées en chiffres arabes (1, 2, 3...) en suivant l'ordre d'appel dans le texte. Toutes les illustrations doivent être sur disquette.

#### 11. Tableaux

Ils seront tous appelés dans le texte et numérotés en chiffre romains (I, II, III, etc.) selon l'ordre d'appel dans le texte. Ils doivent être présentés, chacun sur une feuille séparée. Les légendes des tableaux, des figures, des photos et en général de toutes les illustrations seront rassemblées sur une même feuille et placées en fin de manuscrit.

Errata : *Les Cahiers de l'Economie Rurale* N° 12 – Janvier-Juin 2011  
au lieu de 2010

# Promotion au champ, de la croissance, l'absorption du phosphore et le rendement de maïs (*Zea mays*) par les souches de *Bacillus* isolées des sols du Mali et solubilisant le Phosphate Naturel de Tilemsi

## Field promotion on growth, P uptake and yield of maize (*Zea mays*) by Tilemsi Phosphate Rock-dissolving *Bacillus* strains, isolated from Malian soils

Traoré L.<sup>1,2</sup>, Babana H.<sup>2</sup>, Sacko O.<sup>2</sup>, Yattara I.I.<sup>2</sup>, Antoun H.<sup>4</sup>, Lahbib M.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Institut d'Economie Rurale, IER/CRRA-Sotuba, BP. 262, Bamako, Mali  
Tél. : (+223) 66 72 43 26 ; Courriel : ltraore68@gmail.com

<sup>2</sup>Université de Bamako, Mali

<sup>3</sup>Chaire UNESCO pour l'Environnement, Bamako, Mali

<sup>4</sup>Centre Sève et Centre de Recherche en Horticulture, Université Laval, Québec, Canada

### Résumé

La carence de phosphore (P) est l'un des principaux facteurs limitant la production agricole au Mali. Les cultures répondent bien à la fertilisation phosphatée, mais le coût élevé des engrais chimiques importés restreint leur utilisation par les agriculteurs. Cependant, dans la vallée de Tilemsi, le Mali dispose de gisements de phosphates estimés entre 20 à 25 millions de tonnes, avec une teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de l'ordre de 23 % à 30 %.

Dans le but d'améliorer biologiquement l'absorption de phosphore par le maïs fertilisé avec du phosphate naturel de Tilemsi (PNT), l'effet de l'inoculation de souches de *Bacillus* isolées des sols maliens a été étudié. La croissance et la teneur en P de trois variétés de maïs ont été mesurées en 2007 ; la croissance, la teneur en P et le rendement de la variété de maïs Sotubaka ont été mesurés en 2008 dans des conditions de champ au Mali. L'expérimentation a été menée au cours des saisons agricoles de 2007 et 2008 à la station de recherche agronomique de Samanko située à 15 km au Sud-Ouest du District de Bamako au Mali. Elle est à une latitude de 12°. 31.552' Nord, à une longitude de 8°.04.906' Ouest et à une altitude de 316,8 m. Le sol est de type

ferrugineux tropical peu lessivé, de texture limono sableuse avec 76 % de sable, 15 % de limon et 9 % d'argile (Labosep, IER, 2008). Un dispositif expérimental de type split-plot à trois répétitions a été utilisé avec, en parcelles principales, la fertilisation (le PNT 300 kg/ha (insoluble), l'engrais chimique, le complexe céréale 100 kg/ha (17-17-17) et le témoin sans phosphore. Toutes les parcelles ont reçu la même quantité d'azote N équivalente à 150 kg d'urée. Les compléments N et K de l'engrais chimique ont été corrigés pour toutes les autres parcelles. Les parcelles secondaires étaient composées de trois variétés de maïs (Dembanyuman, Sotubaka, Tiémantié) et les parcelles tertiaires étaient composées de témoin non inoculé et les six inoculations avec les lignées de *Bacillus* solubilisant le PNT. Toutes les lignées appartiennent à *Bacillus subtilis* subsp. *subtilis* (T) ; DSM10. Nos résultats ont montré que la fertilisation phosphatée du maïs avec le PNT ou le complexe céréale (17-17-17) améliore significativement les rendements grain et de la biomasse sèche. L'inoculation avec les souches de bactéries solubilisant le PNT n'a pas influencé la taille des plants après 60 jours de croissance mais elle a significativement influencé l'absorption de P dans les grains et dans la biomasse aérienne sèche. La fertilisation du maïs avec

le PNT et l'inoculation avec ces bactéries ont occasionné une plus grande teneur en phosphore des grains et de la biomasse sèche du maïs. La mycorrhization des racines de maïs par les champignons mycorrhiziens indigènes a été déterminée en utilisant la méthode de Philips et Hyman (1970).

**Mots-clés :** Souches de *Bacillus* dissolvant le PNT, inoculation, l'absorption de P, variété de maïs, mycorrhization.

## Abstract

Phosphorus (P) deficiency is one of the major factors limiting crop production in Mali. Crops respond well to P fertilization, but the high cost of imported chemical fertilizers restrains their use by farmers. However, Mali has in the Tilemsi valley, phosphate rock (PR) deposits estimated between 20 to 25 million tonnes with  $P_2O_5$  content in the range of 23% to 30%.

With the aim of improving biologically P uptake by maize fertilized with Tilemsi phosphate rock (TPR), the inoculation effect of TPR-solubilizing *Bacillus* strains isolated from Malian soils was investigated. The growth and P concentration of three cultivars of maize were measured in 2007 ; growth, P concentration and yield of the cultivar Sotubaka of maize were measured in 2008 under field conditions in Mali. Experimental plots were established at the Samanko agronomic research station (latitude  $12^{\circ} 31' N$ ,  $8^{\circ} 4' W$ , altitude 316.8 m) in 2007 and 2008, located at 15 km from Bamako district. The soil is ferralitic tropical washed type, sand limon texture with 76% of sand, 15% of limon and 9% of clay (Labosep, IER, 2008). A split-split-plot experimental design with three replicates was used. The three main plot treatments included P addition at 300 kg/ha TRP, 100 kg/ha of Complex cereal, the chemical fertilizer (17-17-17) and a control which did not receive any P. All plots received the same amount of N equivalent to 150 kg/ha urea. The additional N and K added with the chemical fertilizer were corrected for all other plots. The sub-plots were the three

cultivars of maize (Dembanyuman, Sotubaka and Tiemantie) and the sub-sub plots included an uninoculated control and inoculation with six TRP-solubilizing *Bacillus* strains, all belonging to the *Bacillus subtilis* subsp. *subtilis* (T); DSM10. Our results have shown that P-fertilization of the cultivar of maize with TPR or the chemical fertilizer (17-17-17) significantly improved grain and shoot dry matter yields. Inoculation with TPR-solubilizing bacteria did not influence plant height sixty days after planting, grain or shoot yields but it significantly influenced grain and shoot P-uptake. Maize fertilized with TPR and inoculated with these bacteria exhibited the highest grain and shoot P-content. The maize roots mycorrhization by the indigenous mycorrhizal fungals was determined using the method of Philips and Hyman (1970).

**Keywords:** TPR-solubilizing *Bacillus* strains, inoculation, P uptake, maize cultivars, mycorrhization.

## I. Introduction

Le phosphore est un élément nutritif essentiel pour la plante. Il est ajouté au sol comme phosphates inorganiques. Une grande partie de ces phosphates utilisés comme engrais est immobilisée après l'application et devient inaccessible pour les plantes (Dey, 1988 ; Singh et Kapoor, 1994). La carence du Phosphore (P) est l'une des contraintes majeures à la production agricole en Afrique de l'Ouest, en général, et au Mali, en particulier. Les engrais importés sont très chers et les agriculteurs, en raison de leur faible pouvoir d'achat, ne peuvent pas les payer. Cependant, le Mali dispose des gisements de phosphate dans la vallée du Tilemsi. Ces gisements qui sont estimés entre 20 et 25 millions de tonnes (SONAREM, 1988), sont une source potentielle de P bon marché pour les agriculteurs (Bationo *et al.*, 1997). L'application directe de PNT pourrait être rentable en comparaison avec les engrais phosphatés importés (Bationo *et al.*, 1997). Le gouvernement du Mali, afin de réduire la dépendance des agriculteurs des engrais chimiques, a mis en place un programme de développement des ressources

locales, notamment le PNT, un des meilleurs phosphates tricalciques d'Afrique de l'Ouest, parce que ayant des propriétés chimiques et minéralogiques favorables à une application directe (Pieri, 1989). Toutefois, SAFGRAD (1985), Bagayoko et Coulibaly (1995) ont rapporté que l'usage des phosphates naturels (NP) par les plantes cultivées n'est pas toujours facile en raison de leur faible solubilité. Leurs études ont montré le faible effet annuel du PNT dans plusieurs zones agro-écologiques du Mali, à cause de sa solubilité lente. Pour améliorer sa solubilité, certaines stratégies parmi lesquelles, l'acidification partielle, l'utilisation du complexe PNT-fumure organique et la sélection des plantes acidifiant la rhizosphère, ont été utilisées ou proposées. Toutes ces tentatives n'ont pas répondu aux attentes des producteurs. Cette déception a eu pour conséquence la réduction drastique du taux d'utilisation du PNT et la fermeture temporaire de l'usine de production. Strullu (1991), Babana et Antoun (2003) ont rapporté que l'efficacité de l'utilisation possible du phosphate naturel par la plante peut être faite en les associant à certains microorganismes naturellement présents dans les sols, ce qui suppose leur rôle important dans la dissolution des phosphates pour rendre le phosphore disponible à la plante. Cela a été démontré par Rodriguez et Fraga (1999); Whitelaw (2000). Les résultats de recherches ont également montré que certaines espèces comme *Azospirillum sp.*, *Enterobacter sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Serratia sp.*, etc., peuvent dissoudre les phosphates naturels et rendre le phosphore disponible pour la plante (Rock *et al.*, 1996 et Komy, 2005). Selon Richardson (2001), la production et la libération de l'acide organique par des microorganismes constituent des mécanismes importants dans la dissolution des phosphates. Babana et Antoun (2003), ont constaté que certaines bactéries rhizosphériques en plus de leur pouvoir de solubilisation du phosphate, sont aussi connues pour leur capacité à produire des produits qui favorisent la croissance de la plante et surtout quand elles sont associées à des champignons mycorhiziens à arbuscules

(AM). Selon Sylvia et Chelleni (2001), les racines de la plupart des plantes cultivées sont colonisées par des champignons mycorhiziens à arbuscules (AM). Outre l'amélioration de l'absorption des nutriments peu mobiles, la symbiose avec les AM est profitable pour la croissance des plantes par d'autres mécanismes d'action tels que l'amélioration de la tolérance à la sécheresse, la protection des plantes contre les pathogènes ou la séquestration du carbone, améliorant ainsi l'agrégation du sol. L'utilisation des microorganismes dans la dissolution des phosphates peut être considérée au Mali puisque le pays dispose d'importants gisements de PNT.

L'objectif de ce travail était de développer un bio-inoculant, basé sur les microorganismes dissolvant le PNT pour améliorer au champ la croissance du maïs, l'absorption du phosphore (P) et le rendement.

## II. Matériel et Méthodes

### 2.1. Microorganismes

L'efficacité des microorganismes solubilisant le PNT a été mesurée sur le *National Botanical Research Institute's Phosphate growth medium* (NBRIP) de Nautiyal (1999), un milieu de culture de bactéries contenant le PNT comme la seule source de phosphore insoluble, décrit par Komy (2005). Un grand nombre d'isolats de bactéries rhizosphériques, provenant du maïs cultivé sur le sol malien, a été sélectionné. Les critères de sélection de ces microorganismes ont été basés sur leur efficacité de solubilisation sur milieu solide, d'une part et, d'autre part, sur milieu liquide, en utilisant la méthode de l'acide ascorbique de Watanabe *et al.* (1965) et la méthode colorimétrique de Tandon *et al.* (1968). Après leur identification par la méthode de biologie moléculaire, les 6 microorganismes sélectionnés étaient très similaires et ils appartenaient tous au *Bacillus subtilis* subsp. *subtilis* (T); DSM10. Ils ont été utilisés dans des essais d'inoculation au champ.

## 2.2. Préparation de l'inoculum et l'inoculation des graines de maïs

Les souches de *Bacillus* ont été cultivées dans 25 ml de milieu liquide NBRIP (Nautiyal, 1999) contenant 5 g/l de PNT comme source de P pendant 48 heures sur un agitateur rotatif à la température ambiante (28°C). Après l'enregistrement de la densité optique de la solution de culture, le volume d'inoculation est déterminé selon la formule de la courbe de croissance pré-établie des cellules et obtenue à partir de comptage direct :  $Y = ax + b$  pour chaque bactérie où  $x$  est égale à la densité optique.

Les courbes de croissance déterminées pour les bactéries sélectionnées sont les suivantes :

- *Bacillus*.subsp 1  $Y = 2.443 x + 4.415$  ;  
*Bacillus*.subsp 2  $Y = 1.299 x + 6.391$  ;  
*Bacillus*.subsp 3  $Y = 1.865 x + 3.862$  ;  
*Bacillus*.subsp 4  $Y = 0.748 x + 6.152$  ;  
*Bacillus*.subsp 5  $Y = 1.090 x + 6.217$  ;  
*Bacillus*.subsp 6  $Y = 1.331 x + 6.619$ .

Les semences de maïs ont été stérilisées en surface comme décrit par Chabot *et al.* (1996). 335 g de graines ont été trempés dans 150 ml de suspension microbienne pendant 4 heures à la température ambiante. Les graines humides ont ensuite été transférées sur une feuille d'aluminium stérile et mélangées à de la poudre de talc. Les semences ainsi enrobées sont séchées pendant une nuit sous une hotte à flux laminaire à la température ambiante. Les semences témoins non inoculées ont été traitées de la même manière. Avant de semer les graines, la qualité d'inoculation a été déterminée. Chaque graine de maïs enrobée contenait en moyenne  $2.5 \cdot 10^6$  CFU de *Bacillus*.subsp<sub>1</sub> ;  $3 \cdot 10^6$  CFU de *Bacillus*.subsp<sub>2</sub> ;  $5 \cdot 10^6$  CFU de *Bacillus*.subsp<sub>3</sub> ;  $2.9 \cdot 10^6$  CFU de *Bacillus*.subsp<sub>4</sub> ;  $1.5 \cdot 10^6$  CFU de *Bacillus*.subsp<sub>5</sub> et  $5 \cdot 10^6$  CFU de *Bacillus*.subsp<sub>6</sub>.

## 2.3. Le phosphate naturel

Le phosphate utilisé dans notre expérimentation a été celui prélevé au nord du Mali, dans la vallée du Tilemsi, d'où l'appellation « PNT ». Le PNT contient entre 23% et 30% de  $P_2O_5$ . Il est soluble dans le citrate à 13,52%, dans l'acide citrique à 38,46%, dans l'acide formique à 61,21% et dans l'eau à 3,87% (Sacko, 2006). La teneur en minéraux est la suivante :  $P_2O_5$  30% ; Ca 30,8% ;  $CO_2$  2,3% ; K 0,04% ; Na 0,08% ; Mg 0,21% ; Fe 0,86% ; Al 0,51% ; S 0,24% ; Cl 0,17% ; F 2,6% (Sacko, 2006).

## 2.4. Expérimentations au champ

Des parcelles d'expérimentation ont été installées en 2007 et 2008 à la station de recherche agronomique de Samanko, située à 15 km au sud-ouest du District de Bamako. Le sol était sablo-limoneux avec un pH 4,8, 0,19% de matière organique et de 3,44 kg/ha de P et une pluviométrie moyenne annuelle de 800 à 900 mm. Un dispositif expérimental de type split plot à trois répétitions a été utilisé avec, en parcelles principales, la fertilisation (le PNT à 300 kg/ha insolubles, apportés au semis, le complexe céréale (engrais chimique) 100 kg/ha (17-17-17) au semis et le témoin sans phosphore. Toutes les parcelles ont reçu la même quantité d'azote N équivalente à 150 kg d'urée appliqués en doses fractionnées de 50 kg au semis et 100 kg/ha à la montaison du maïs (30 jours après le premier apport). Les compléments N et K de l'engrais chimique ont été corrigés pour toutes les autres parcelles. Les parcelles secondaires étaient composées de trois variétés de maïs (Dembanyuman, Sotubaka et Tiémantié) et les sous-parcelles étaient composées d'un témoin non inoculé et l'inoculation avec les six souches de *Bacillus* dissolvant le PNT. Les parcelles principales (fertilisation) étaient de 16 m de large et 16,8 m de long (268,8 m<sup>2</sup>) séparées par une allée de 1 m. Elles ont été divisées en trois sous parcelles ou parcelles secondaires pour les trois variétés de maïs. Elles étaient

de 22,4 m<sup>2</sup> (5,6 m x 4 m)/sous parcelle. Elles ont été séparées par un intervalle 50 cm. Les sous-sous parcelles ou parcelles tertiaires constituées par les 6 souches de bactéries et le témoin étaient de 3,2 m<sup>2</sup> (0,8 m x 4 m). La superficie totale de l'expérimentation était de 943,2 m<sup>2</sup> (52,4 m x 18 m). Le maïs a été semé à raison de 3 graines par poquet avec 50 cm entre les poquets et 80 cm entre les lignes. Le démariage a été fait 15 jours après le semis à raison de 2 plants/poquet, soit une densité de 50 000 plants/ha. Le semis a été fait le 8 août 2007 et la récolte le 25 octobre 2007, sur une pluviométrie annuelle de 715,4 mm.

En 2008, la même expérimentation a été répétée, mais seule la variété Sotubaka a été utilisée et le dispositif expérimental a été un split-plot. Les parcelles principales (fertilisation) ont été de 5 m de large et 21 m de long (105 m<sup>2</sup>) séparées par une allée de 1 m, et divisées en sous parcelles de sept traitements constitués par les 6 souches de bactéries rhizosphériques et le témoin sans inoculation d'une superficie de 15 m<sup>2</sup>/traitement (5 m x 3 m) ; les traitements étaient séparés par un intervalle de 0,5 m. Chaque traitement avait 5 lignes de maïs avec 2 lignes de bordure et 3 lignes centrales utilisées pour les différentes observations. La superficie totale de l'expérimentation était de 1309 m<sup>2</sup> (77 m x 17 m). L'essai a été semé le 17 juillet 2008 et récolté le 5 novembre 2008, sur une pluviométrie annuelle de 945,5 mm.

## **2.5. Colonisation des racines par le champignon mycorrhizien à arbuscule (AM)**

Les racines des plants inoculés et non inoculés avec les bactéries en présence ou non du champignon mycorrhizien, pour tous les traitements, ont été coupées et lavées soigneusement à l'eau de robinet. Ces racines ont été colorées selon la technique du bleu de Trypan et lactophénol de Philips et Hayman

(1970) pour mesurer le pourcentage de racines mycorrhizées par le champignon.

## **2.6. Analyse du sol et de la plante**

L'analyse physico-chimique du sol de la station expérimentale de Samanko a été effectuée par le Laboratoire de Chimie de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université de Bamako en utilisant la méthode de Bray-1 (Olsen et Sommers, 1982). C'était un sol limoneux-sableux avec un pH de 4,8; C/N 3,8; OM 0,19% ; P assimilable 3.44 kg/ha ; K 147.2 kg/ha ; Ca 793,53 kg/ha et Mg 47,74 kg/ha. La teneur en phosphore des grains et de la biomasse sèche a été déterminée par le Laboratoire de Nutrition Animale de l'Institut d'Economie Rurale du Mali et par le Laboratoire de Microbiologie des Sols du Centre de Recherche en Horticulture de l'Université Laval, Canada. Les méthodologies utilisées ont été celle de l'acide ascorbique de Watanabé *et al.*, (1965) et la méthode colorimétrique de Tandon *et al.* (1968).

## **2.7. Collecte des données**

Pour les différentes expérimentations, les données collectées étaient les suivantes, d'une part, pour les paramètres de croissance 30 et 60 jours après le semis : la taille, le nombre de feuilles, la biomasse végétale sèche, la biomasse racinaire et l'infection mycorrhizienne des racines et, d'autre part, à la récolte : le rendement grain kg/ha, le poids de 1000 grains, le volume racinaire des plants, la teneur en phosphore des grains et de la biomasse aérienne sèche.

## **2.8. Analyse statistique**

L'analyse de variance à trois facteurs (fertilisation, variétés de maïs et micro-organismes dissolvant le phosphate) a été faite en utilisant le logiciel SAS (1990) pour dégager la différence entre les traitements.

### III. Résultats

#### 3.1. Taille de la plante

L'essai de 2007 a montré qu'après 30 jours de croissance, l'effet de l'inoculation des microorganismes dissolvant le phosphate (MDP) sur la taille était hautement significative à  $P < 0,05$  (Tableau I) ; aucune différence n'a été observée entre les isolats après 60 jours de croissance (Tableau II). Le maïs inoculé en présence du PNT a été plus haut de 26,39 cm que celui fertilisé avec le complexe céréale et de 25,12 cm de plus que la condition sans phosphore pour le Sotubaka ; 11,8 cm et 12,64 cm pour Dembanyuman ; 16,26 cm et 18,60 cm pour Tiémantié. Ceci indique que, pour la taille des plants, l'activité de solubilisation du PNT peut offrir un meilleur effet comparé à celui de l'engrais chimique après 30 jours de croissance (Tableau II).

#### 3.2. Biomasse végétale sèche et biomasse racinaire

L'effet de la fertilisation phosphatée sur le poids de la matière sèche a été hautement significatif à ( $P < 0,001$ ), et significatif pour les variétés et l'inoculation avec les MDP à ( $P < 0,05$ ). Après 60 jours, la fertilisation phosphatée et l'inoculation ont été hautement significatives à ( $P < 0,01$ ), (Tableau I). Il n'y avait pas de différence statistique entre les bactéries sélectionnées. L'effet

de l'inoculation de Sotubaka en présence de PNT s'est traduit par une augmentation de la biomasse sèche (paille) de 43,35 kg/ha par rapport au complexe céréale sans inoculation, soit 48,50% et 56,77 kg/ha par rapport au traitement sans phosphore, soit 74,76% (Tableau III). Pour le poids sec de la biomasse racinaire, la fertilisation phosphatée était hautement significative à ( $P < 0,01$ ) et significatif pour l'inoculation à ( $P < 0,05$ ) 30 jours après le semis. L'effet de l'inoculation était hautement significative à ( $P < 0,01$ ) et l'interaction entre la fertilisation phosphatée et l'inoculation a été importante 60 jours après le semis (Tableau I). L'effet de l'inoculation en présence de PNT a causé une augmentation de 8,98 kg/ha (73,72%) par rapport au complexe céréale et 14,91 kg/ha (238%) par rapport au sans phosphore (Tableau IV).

La même tendance a été observée avec Dembanyuman et le Tiémantié (Tableaux III et IV). Parmi les variétés, Sotubaka a été statistiquement différente des autres pour la majorité des paramètres mesurés (Tableau V) et également parmi les sources de phosphore, le PNT a fait la différence par rapport au Complexe céréale et au Sans phosphore (Tableau VI). En 2007, la sécheresse survenue au moment de la floraison des plants n'a pas permis d'obtenir de rendement grains fiable. Par conséquent, l'expérience a été répétée en 2008 avec la variété Sotubaka.

**Tableau I.** Analyse de variance pour la taille, les biomasses végétale et racinaire sèches des variétés de maïs fertilisées avec le PNT ou le complexe céréale et inoculées avec différents microorganismes dissolvant le phosphate (MDP), en 2007.

Source de variation	dl	Carrés moyens					
		Taille1 (cm)	Taille2 (cm)	Biomasse1 (kg/ha)	Biomasse2 (kg/ha)	Poids racinaire1 (kg/ha)	Poids racinaire2 (kg/ha)
SP (fertilisation)	2	745,63ns	409,59ns	462,55***	71,36ns	16,98***	13,82ns
Répétitions	2	2133,33ns	4478,57*	153,31**	6182,75***	4,72***	247,31**
SP erreur	4	1309,92	1343,56	3,44	584,10	0,09	10,45
Variétés	2	5572,61***	930,18ns	178,55*	1757,72ns	4,74ns	19,09ns
SP x variétés	4	349,20ns	3428,28ns	37,62ns	1611,81ns	1,98ns	56,81ns
Sous parcelles erreur	12	192,52	1540,48	41,93	709,28	2,18	36,61
MDP	6	1100,57***	1046,66ns	44,65*	1112,47***	3,53*	75,26***
Variétés x MDP	12	164,69ns	330,57ns	12,85ns	203,13ns	0,99ns	30,94ns
SP x MDP	12	87,14ns	1181,69*	12,33ns	994,06**	1,00ns	21,43ns
P x variétés x MDP	24	221,60ns	576,33ns	20,29ns	407,64ns	1,63ns	32,03*
Sous sous parcelles erreur	108	179,32	553,70	21,01	414,53	1,40	18,31
CV %		23,43	32,77	59,36	62,02	90,23	79,13

1, 2 = 30 et 60 jours respectivement ; \* \*\* \*\*\* = significatif à  $P < 0,05$ ,  $P < 0,01$  et  $P < 0,001$  respectivement ; ns = non significatif ; CV = coefficient de variation ; SP = source de phosphore ; MDP = microorganismes dissolvant le phosphate ; dl = degré de liberté.

**Tableau II.** Effet de l'interaction inoculation-source de phosphore sur la taille des plants de maïs Sotubaka, Dembanyuman, Tiémantié, 30 jours après semis (2007)

MDP	Sotubaka			Dembanyuman			Tiémantié		
	PNT	CC	SP	PNT	CC	SP	PNT	CC	SP
<i>Bacillus.subspI</i> <sub>1</sub>	60,00 bc	51,67 ab	65,00	66,67 ab	56,67	53,33	55,00	48,33 ab	28,33 ab
<i>Bacillus.subspI</i> <sub>2</sub>	66,67 abc	53,33 a	61,67	70,00 ab	68,33	67,67	58,33	63,33 a	43,33 ab
<i>Bacillus.subspI</i> <sub>3</sub>	61,67 abc	60,00 a	65,00	71,67 a	63,33	65,00	46,67	38,33 b	50,00 ab
<i>Bacillus.subspI</i> <sub>4</sub>	83,33 a	58,33 a	55,00	65,00 ab	80,00	58,33	50,80	40,00 b	41,67 ab
<i>Bacillus.subspI</i> <sub>5</sub>	75,00 ab	68,33 a	46,67	61,67 ab	73,33	45,00	55,00	36,67 b	53,33 a
<i>Bacillus.subsp I</i> <sub>6</sub>	76,67 ab	63,33 a	65,00	63,33 ab	65,00	55,00	55,00	45,00 ab	50,00 ab
Témoin	51,67 c	3,00 b	48,33	43,33 ab	51,67	51,67	46,67	35,00 b	36,67 ab
ppds (0,05)	23,27	36,97	ns	27,46	ns	ns	ns	19,21	22,60

PNT= Phosphate Naturel de Tilemsi ; CC = Complexe céréale ; SP = sans phosphore ; ppds= plus petite différence significative ; les moyennes suivies par les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes à ( $P < 0.05$ ) ; MDP=microorganismes dissolvant le PNT ; *Bacillus subtilis* W39 (BS. W39), *Bacillus megaterium* NBPP68 (BM NBPP68), *Bacillus subtilis* S64 (BS.S64), *Bacillus subtilis* FR-S7Aa (BS.FR-S7Aa), *Bacillus sp* AS-SO1a (B.sp. AS-SO1a), *Bacillus subtilis* L4 (BS. L4).

**Tableau III.** Effet de l'interaction inoculation-source de phosphore sur la biomasse aérienne sèche (kg/ha) des variétés de maïs Sotubaka, Dembanyuman, Tiémantié, 60 jours après semis (2007)

MDP	Sotubaka			Dembanyuman			Tiémantié		
	PNT	CC	SP	PNT	CC	SP	PNT	CC	SP
<i>Bacillus.subspI<sub>1</sub></i>	171,8	216,25	40,62 b	44,68 bc	148,12	88,43 ab	139,06	62,25	99,69 ab
<i>Bacillus.subspI<sub>2</sub></i>	115,6	101,56	187,75 a	45,00 bc	115,52	148,43 a	103,12	50,00	162,18 a
<i>Bacillus.subspI<sub>3</sub></i>	118,4	235,90	150,00 ab	140,00 a	59,38	111,87 ab	151,56	84,38	86,25 ab
<i>Bacillus.subspI<sub>4</sub></i>	165,7	144,06	83,55 b	66,25 bc	124,68	76,25 ab	178,12	114,06	83,75 ab
<i>Bacillus.subspI<sub>5</sub></i>	94,1	141,25	54,04 b	128,75 bc	68,75	46,25 b	90,62	81,25	100,00 ab
<i>Bacillus.subspI<sub>6</sub></i>	130,6	190,06	84,37 b	100,00 ab	49,38	93,75 ab	121,87	56,87	70,00 ab
Témoin	55	89,37	75,93 b	26,43 c	81,25	92,18 ab	123,25	46,56	112,49 b
ppds (0,05)	ns	ns	142,50	62,8	ns	87,18	ns	ns	89,37

PNT= Phosphate Naturel de Tilemsi ; CC = Complexe céréale ; SP = sans phosphore ; ppds = plus petite différence significative ; les moyennes suivies par les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes à ( $P < 0.05$ ) ; MDP = microorganismes dissolvant le PNT ; *Bacillus subtilis* W39 (BS. W39), *Bacillus megaterium* NBPP68 (BM NBPP68), *Bacillus subtilis* S64 (BS.S64), *Bacillus subtilis* FR-S7Aa (BS.FR-S7Aa), *Bacillus sp* AS-SO1a (B.sp. AS-SO1a), *Bacillus subtilis* L4 (BS. L4).

**Tableau IV.** Effet de l'interaction inoculation-source de phosphore sur la biomasse racinaire (kg/ha) des variétés de maïs Sotubaka, Dembanyuman, Tiémantié, 60 jours après semis (2007).

MDP	Sotubaka			Dembanyuman			Tiémantié		
	PNT	CC	WP	PNT	CC	WP	PNT	CC	WP
<i>Bacillus.subsp</i> <sub>1</sub>	23,12	14,68	10,62 b	6,25 b	35,62	25,31	37,50	12,50 ab	18,23 ab
<i>Bacillus.subsp</i> <sub>2</sub>	13,12	14,06	53,12a	5,00 b	27,50	27,18	21,88	11,25 ab	22,19 a
<i>Bacillus.subsp</i> <sub>3</sub>	10,00	12,81	16,87 b	10,31 ab	12,50	6,25	17,19	22,50 ab	11,56 ab
<i>Bacillus.subsp</i> <sub>4</sub>	20,62	17,81	20,93 b	8,12 b	12,50	10,93	23,43	31,25 a	41,87 ab
<i>Bacillus.subsp</i> <sub>5</sub>	25,12	12,50	6,66 b	6,56 b	14,37	13,43	11,88	14,36ab	15,94 ab
<i>Bacillus.subsp</i> <sub>6</sub>	35,00	19,37	29,68 ab	20,62 a	7,50	16,56	23,12	6,88 b	17,81 ab
Témoin	7,18	12,18	6,25 b	3,75 b	8,43	12,18	17,50	6,25 b	6,25 b
ppds (0,05)	ns	ns	31,56	7,81	ns	ns	ns	27,50	13,44

PNT= Phosphate Naturel de Tilemsi ; CC = Complexe céréale ; SP = sans phosphore ; ppds= plus petite différence significative ; les moyennes suivies par les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes à (P<0.05) ; MD= *Bacillus maritimum* NBPP68 (BM NBPP68), *Bacillus subtilis* S64 (BS.S64), SO1a), *Bacillus subtilis* L4 (BS. L4), *Bacillus subtilis* W39 (BS. W39), *Bacillus subtilis* FR-S7Aa (BS.FR-S7A), *Bacillus subtilis* FR-S7Ab (BS.FR-S7A), *Bacillus subtilis* AS-SO1a (B.sp. AS-SO1a).

**Tableau V.** Effet variété sur la taille des plants, le nombre de feuilles, les biomasses aérienne et racinaire, 30 et 60 jours après semis (2007).

Variétés	Taille 1 (cm)	Taille 2 (cm)	Nombre de feuilles1	Nombre de feuilles2	Poids racinaire1 kg/ha	Poids racinaire2 kg/ha	Rdt. biom1 kg/ha	Rdt. biom2 kg/ha
Sotubaka	60,55 a	69,71 a	6,34 a	10,22 a	45,00 a	145,00	247,50 a	950,00 a
Dembanyuman	64,36 a	69,43 b	6,46 a	9,48 b	27,5 b	117,50	177,50 b	702,50 b
Tiémantié	46,50 b	76,22 b	5,87 b	10,45 a	27,5 b	140,00	160,00 b	792,50 b
ppds (0,05)	4,93	8,75	0,33	0,72	10	ns	42,25	185

1, 2 = 30 et 60 jours respectivement : ppds= plus petite différence significative ; les moyennes suivies par les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes à ( $P < 0.05$ ) ; Rdt = rendement

**Tableau VI.** Effet de la fertilisation phosphatée sur la taille des plants, le nombre de feuilles, la biomasse sèche et le poids racinaire 30 et 60 jours après semis (2007).

Source de P	Taille1 (cm)	Taille 2 (cm)	Nombre de feuilles1	Nombre de feuilles2	Poids racinaire1 kg/ha	Poids racinaire2 kg/ha	Rdt.biom1 kg/ha	Rdt.biom2 kg/ha
PNT	61,11 a	74,68	6,37 a	10	32,25 a	130,00	215,00 a	34,03
CC	51,00 b	69,87	6,32 ab	9	45,00 a	147,50	245,00 a	31,99
SP	55,32 b	70,81	6,00 ab	10	17,50 b	147,50	115,00 b	32,45
ppds (0,05)	4,93	ns	0,33	ns	10,00	ns	42,25	ns

1, 2 = 30 et 60 jours respectivement : ppds= plus petite différence significative ; les moyennes suivies par les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes à ( $P < 0.05$ ) ; Rdt = rendement : PNT= phosphate naturel de Tilemsi ; CC= complexe céréale ; SP = sans phosphore, biom=biomasse.

### 3.3. Volume racinaire, rendements grain et biomasse aérienne sèche

Il a été retenu de l'expérience de 2008 un effet significatif de la source de phosphore sur le volume des racines, le rendement grain (kg/ha) et le poids de 1000 grains à ( $P < 0,05$ ). Une interaction hautement positive de la source de phosphore et l'inoculation à ( $P < 0,01$ ) pour le rendement grain (Tableau VII). Un volume racinaire élevé a été observé dans les traitements PNT par rapport aux traitements complexe céréale et sans phosphore. Hinsinger et Gilkes, (1997) ont mentionné que le maximum d'efficacité agronomique des phosphates sur les cultures peut être expliqué par la nature de l'acidification partielle du sol et la densité des racines. Une densité élevée de racines peut faciliter l'exploitation d'un grand volume de sol pour le phosphore, en raison de la présence d'un nombre plus important de fines racines par unité de volume de sol. La fertilisation phosphatée de la variété de maïs Sotubaka avec le PNT ou avec l'engrais chimique NPK (17-17-17) a significativement amélioré les rendements grain et de la biomasse sèche. En effet, les rendements grains moyens étaient de 3378 kg/ha, 3120 kg/ha et 2448 kg/ha, et ceux de la biomasse sèche étaient de 3606 kg/ha, 3553 kg/ha et 2663 kg/ha, respectivement pour le PNT l'engrais chimique et le témoin non fertilisé (Tableau VIII). L'effet de l'inoculation en présence

du PNT a occasionné une augmentation de rendement grain de maïs de 371,5 kg/ha soit 12,33% par rapport au complexe céréale sans inoculation et de 1012 kg/ha soit 42,72% par rapport au traitement sans phosphore sans inoculation (Tableau IX). Le poids de 1000 grains a eu une augmentation due à l'inoculation de 12,28 g en présence du PNT par rapport au Complexe céréale. Ceci indique un effet positif de l'inoculation sur le poids des grains en présence du PNT.

Quant à la biomasse sèche, les rendements les plus élevés ont été de 4032 kg/ha et de 4154 kg/ha avec *Bacillus.subspI<sub>3</sub>*, respectivement en conditions PNT et complexe céréale. L'effet de l'inoculation en présence du PNT s'est situé à 296,93 kg/ha soit 8,46% d'augmentation par rapport au complexe sans inoculation et à 693,83 kg/ha soit 23,51% d'augmentation par rapport au traitement sans phosphore sans inoculation. Ceci explique que le maïs inoculé en présence du PNT peut produire des rendements grains (kg/ha) et de la biomasse sèche (kg/ha) comparables à ceux produits par l'engrais chimique importé, le complexe céréale. Les moyennes de valeurs des rapports grains/biomasse sèche des plantes inoculées avec les souches de bactéries rhizosphériques sont de 0,90, 0,85 et 0,79 respectivement pour PNT, complexe céréale et sans phosphore indiquant relativement un bon indice de productivité en condition PNT (Tableau IX).

**Tableau VII.** Analyse de variance pour le volume racinaire, le rendement grain, la teneur en phosphore des grains, le poids de 1000 grains, le rendement et la teneur en phosphore de la biomasse végétale, de la variété de maïs Sotubaka fertilisée avec le PNT or le complexe céréale et inoculée avec les MDP (2008)

Carrés Moyens							
Source de variation	dl	Volume racinaire (Cm <sup>3</sup> )	Rdt. Grain (kg/ha)	P des Grains (kg/ha)	Poids de 1000 grains (g)	Rdt. biom (kg/ha)	P de la biomasse (kg/ha)
SP (fertilisation)	2	10769,10*	4841460*	12,61**	2024,83*	1688091ns	4,56ns
Répétitions	2	276,98ns	170690ns	0,30ns	2137,90*	384257ns	0,73ns
Erreur SP	4	1158,21	538764	0,54	329,85	3285279ns	3,74
MDP	6	3617,23ns	199355ns	0,39*	270,06ns	606083ns	1,63*
SP x MDP	12	2143,87ns	440380**	0,60**	212,87ns	489279ns	0,88ns
Erreur Sous parcelle	36	1701,64	150799	0,17	183,39	478264	0,56
CV %		34,01	13,02	12,93	6,17	20,06	20,55

1, 2 = 30 et 60 jours respectivement; \* \*\* \*\*\* = significatif à  $P < 0,05$ ,  $P < 0,01$  et  $P < 0,001$  respectivement; ns = non significatif; CV = coefficient de variation; SP = Source de phosphore; Rdt = rendement; dl = degré de liberté.

**Tableau VIII.** Effet de la fertilisation phosphatée sur le rendement, la teneur en phosphore des Grains, le poids de 1000 grains, le rendement et la teneur en phosphore de la biomasse sèche, et le volume racinaire (2008).

Source de P	Rdt. Grains (kg/ha)	P. Grains (kg/ha)	1000 grains (g)	Rdt. biomasse (kg/ha)	P. biomasse (kg/ha)	Volume racinaire (cm <sup>3</sup> )
PNT	3378 a	3,960 a	229,13 a	3606 a	3,992 a	145,55 a
CC	3120 b	3,401 b	219,17 b	3553 a	3,859 a	117,56 b
SP	2448 c	2,428 c	209,50 b	2663 b	3,127 b	110,35 b
ppds (0.05)	254	0,620	9,27	425,55	3,52	26,36

1, 2 = 30 et 60 jours respectivement; ppds= plus petite différence significative; les moyennes suivies par les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes à ( $P < 0,05$ ); Rdt = rendement; PNT = phosphate naturel de Tilemsi; CC = complexe céréale; SP = sans phosphore; P = phosphore.

Tableau IX. Effet de l'inoculation sur la production de matière sèche végétale et le rapport grain/biomasse (2008).

MDP	Rendement grain kg/ha			Biomasse sèche kg/ha			Rapport grain/biomasse sèche		
	PNT	Complexe	Sans P	PNT	Complexe	Sans P	PNT	Complexe	Sans P
<i>Bacillus.subspI<sub>1</sub></i>	3407 ab	3200 ab	2578 ab	3949 ab	3511 a	2688 b	0,86	0,91	0,96
<i>Bacillus.subspI<sub>2</sub></i>	3793 a	2726 b	2489 ab	3855 abc	2201 b	2986 ab	0,98	0,86	0,83
<i>Bacillus.subspI<sub>3</sub></i>	2785 b	3052 ab	2815 a	3200 c	3863 a	4067 a	0,87	0,79	0,69
<i>Bacillus.subspI<sub>4</sub></i>	2933 b	3111 ab	2822 a	3535 abc	3389 ab	3229 ab	0,83	0,91	0,87
<i>Bacillus.subspI<sub>5</sub></i>	3911 a	3615 a	2222 bc	4032 a	4154 a	3499 a	0,97	0,87	0,64
<i>Bacillus.subspI<sub>6</sub></i>	3466 ab	3012 ab	1837 c	3298 bc	3801 a	2418 b	0,88	0,79	0,76
Témoin	3248 ab	3011 ab	2370 ab	3476 abc	3348 ab	2951 ab	0,94	0,92	0,80
ppds	772,5	714,18	532,99	705 55	1601,6	1227,6			

PNT = phosphate naturel de Tilemsi ; Complexe = Complexe céréale ; Sans phosphore = fertilisation sans source de phosphore ; MDP = Microorganismes dissolvant le phosphore ; ppds = plus petite différence significative, les moyennes suivies par les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes à ( $P < 0,05$ ) ; *Bacillus subtilis* W39 (BS. W39), *Bacillus megaterium* NBPP68 (BM NBPP68), *Bacillus subtilis* S64 (BS.S64), *Bacillus subtilis* FR-S7Aa (BS.FR-S7Aa), *Bacillus sp* AS-SO1a (*B.sp.* AS-SO1a), *Bacillus subtilis* L4 (BS. L4).

### 3.4. Mobilisation du phosphore dans la plante de maïs

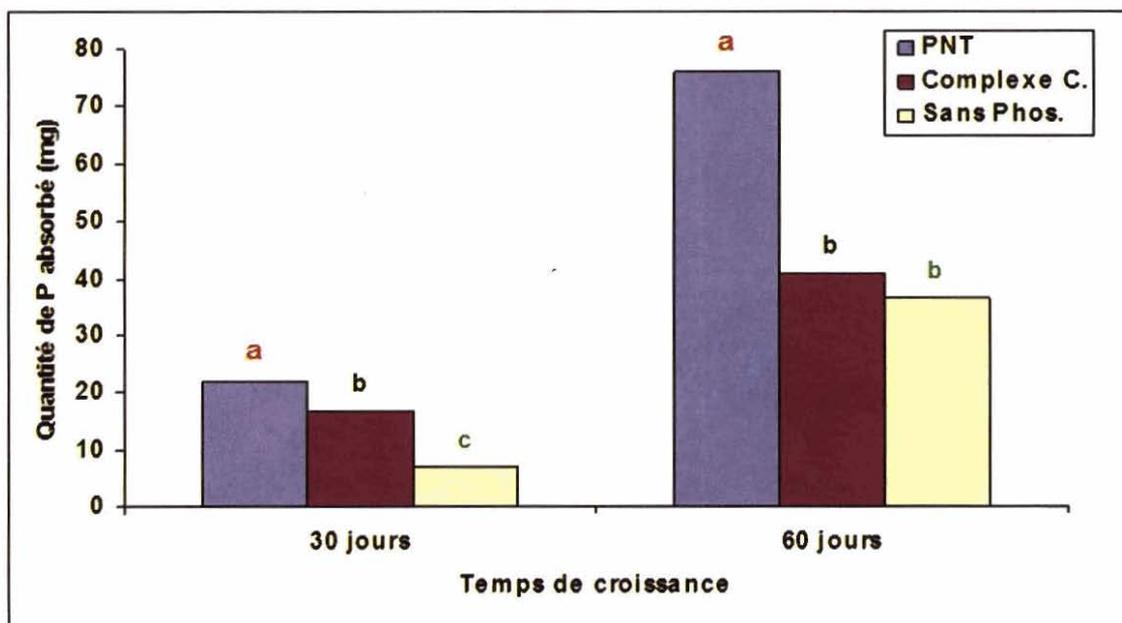
La teneur en phosphore d'une plante est la quantité de phosphore extraite de la plante par analyse chimique ou par le dosage de P et, cela, selon la méthode colorimétrique de Tandon *et al.* (1968). Cette quantité de P est celle absorbée par la plante au cours de la saison agricole.

L'effet de la source de phosphore sur la teneur en (P) des grains était hautement significatif à ( $P < 0,01$ ) ; l'effet de l'inoculation a été significatif à ( $P < 0,05$ ) pour le rendement de la biomasse sèche et l'effet de l'interaction source de phosphore et inoculation était significatif à ( $P < 0,05$ ) (Tableau VII). Ceci a indiqué un effet positif de la source de phosphore et l'inoculation sur l'absorption de phosphore par la plante de maïs en conditions de champ. Après 30 et 60 jours de croissance, l'inoculation avec les bactéries dissolvant le phosphate a significativement et positivement influencé l'absorption de P par la plante de maïs. Cette absorption de P par les trois variétés de maïs testées était plus élevée lorsque le PNT était en présence des bactéries dissolvant le

phosphate. Dans les conditions expérimentales utilisées, la variété de maïs Sotubaka a bien répondu à la fertilisation phosphatée et à l'inoculation en présence des bactéries dissolvant le PNT (Figures 1, 2 et 3).

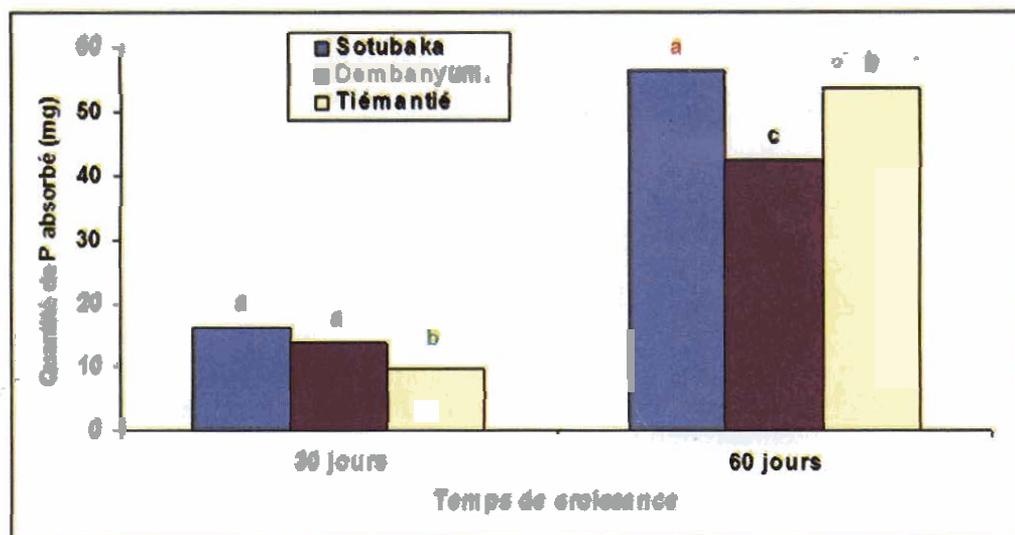
Les figures 1, 2 et 3 illustrent respectivement la performance des sources de phosphore, les variétés et l'inoculation avec les MDP sur l'absorption de P pendant les phases de la montaison (30 jours après semis) et de la floraison (60 jours après semis).

Pendant les 2 phases, l'absorption de P a été supérieure en condition PNT comparée à celles du Complexe et du Sans phosphore (Figure 1). Il en a été de même pour la variété Sotubaka comparé au Dembanyuman et Tiémantié (Figure 2). Quant aux isolats de souches de bactéries : *Bacillus subtilis* subsp. *subtilis* (T) ; DSM10, elles se sont montrées relativement plus performantes que le témoin pendant la première phase (30 jours après semis). Dans la deuxième phase (60 jours après semis), l'effet des bactéries avoisine plus du double du témoin. Aucune différence significative n'a été observée entre les bactéries (Figure 3).



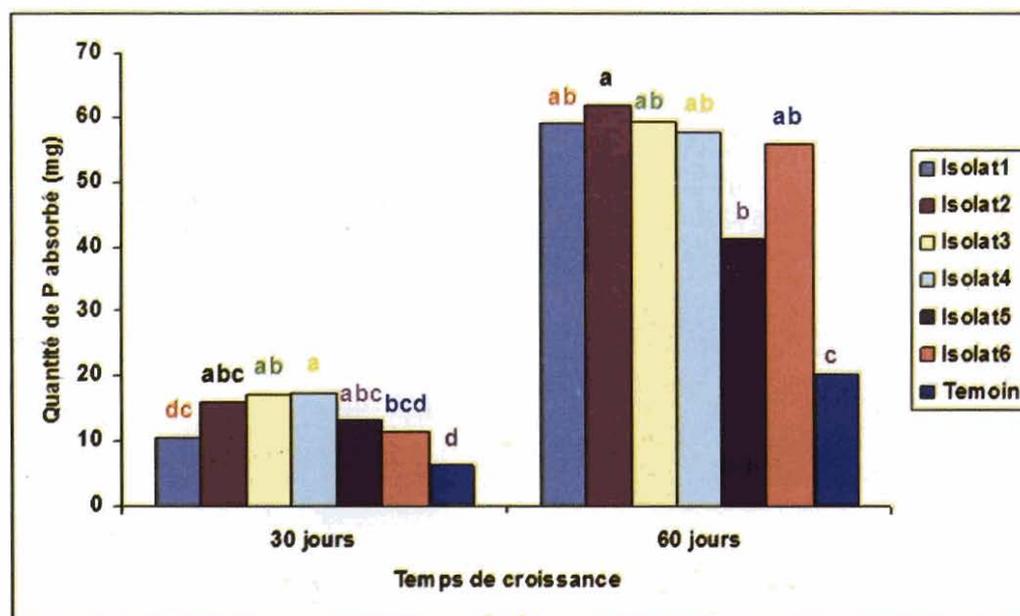
Les moyennes suivies par les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes conformément au Test LSD protégé de Fisher ( $P < 0,05$ )

Figure 1. Effet source de phosphore et inoculation, sur l'absorption de P (en mg) par le maïs après 30 et 60 jours de croissance (2007).



Les moyennes suivies par les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes conformément au Test LSD protégé de Fisher ( $P < 0,05$ )

Figure 2. Effet variété et inoculation, sur l'absorption de P (en mg) par le maïs après 30 et 60 jours de croissance (2007).



Les moyennes suivies par les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes conformément au Test LSD protégé de Fisher ( $P < 0,05$ )

Figure 3. Effet de l'inoculation, sur l'absorption de P (mg) par le maïs après 30 et 60 jours de croissance (2007).

L'analyse statistique n'a pas montré de différences significatives entre les traitements PNT avec inoculation et le complexe céréale en ce qui concerne les rendements grains et de la biomasse sèche, indiquant ainsi qu'avec ces MDP l'on peut avoir des rendements

comparables à ceux obtenus avec l'engrais chimique importé à des coûts élevés. Ils ont aussi significativement influencé la teneur en phosphore des grains et de la biomasse. Le maïs fertilisé avec du PNT et inoculé avec des bactéries présentaient la plus forte teneur

en phosphore des grains et de la biomasse sèche (Tableaux X et XI). L'inoculation de la variété Sotubaka en présence de la fertilisation phosphatée a amélioré la teneur en (P) des grains de Sotubaka de 25,11 % dans les traitements avec PNT, 13,28 % avec le complexe céréale ; 55,57 % et 10,92 % pour

la biomasse sèche. L'effet de l'inoculation en condition PNT sur la teneur en P des grains a été supérieur de 25,39 % par rapport au complexe céréale et 78,88 % de plus que le traitement sans phosphore ; 13,17 % et 102,4 % pour la biomasse sèche dans le même ordre.

**Tableau X.** Effet source de phosphore-inoculation sur la teneur en phosphore des grains du maïs Sotubaka, kg/ha (2008).

Microorganismes	Teneur en phosphore des Grains (kg/ha)		
	PNT	CC	SP
<i>Bacillus.subspl</i> <sub>1</sub>	4,09 ab	3,52 ab	2,56 ab
<i>Bacillus.subspl</i> <sub>2</sub>	4,55 a	3,00 b	2,49 ab
<i>Bacillus.subspl</i> <sub>3</sub>	3,35 b	3,36 ab	2,82 a
<i>Bacillus.subspl</i> <sub>4</sub>	3,31 b	3,42 ab	2,82 a
<i>Bacillus.subspl</i> <sub>5</sub>	4,69 a	3,98 a	2,22 bc
<i>Bacillus.subspl</i> <sub>6</sub>	4,16 ab	3,32 ab	1,84 c
Témoin non inoculé	3,57 b	3,21 ab	2,25 bc
ppd (0.05)	0, 889	0,802	0,506

*Ppds* = plus petite différence significative ; les moyennes suivies par les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes à ( $P < 0.05$ ) ; PNT = phosphate naturel de Tilemsi ; CC = complexe céréale ; SP = sans phosphore

**Tableau XI.** Effet source de phosphore-inoculation sur la teneur en phosphore de la biomasse végétale sèche du maïs Sotubaka, kg/ha (2008)

Microorganismes	Teneur en phosphore de la biomasse aérienne sèche (kg/ha)		
	PNT	CC	SP
<i>Bacillus.subspl</i> <sub>1</sub>	4,56 ab	3,57	2,82 bc
<i>Bacillus.subspl</i> <sub>2</sub>	4,45 bc	3,24	3,14 abc
<i>Bacillus.subspl</i> <sub>3</sub>	3,70 c	4,07	4,27 a
<i>Bacillus.subspl</i> <sub>4</sub>	4,08 bc	3,93	3,39 abc
<i>Bacillus.subspl</i> <sub>5</sub>	4,66 a	4,38	3,67 ab
<i>Bacillus.subspl</i> <sub>6</sub>	3,81 bc	4,03	2,53 bc
Témoin non inoculé	2,67 d	3,72	2,08 c
ppds (0,05)	0,826	1,728	1,350

*Ppds* = plus petite différence significative ; les moyennes suivies par les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes à ( $P < 0.05$ ) ; PNT = phosphate naturel de Tilemsi ; CC = complexe céréale ; SP = sans phosphore.

### 3.5. Infection des racines de maïs par les mycorrhizes indigènes après deux mois de croissance

Les résultats du Tableau XII montrent le pourcentage moyen de l'infection mycorrhizienne qui était supérieure pour les *Bacillus.subspI<sub>2</sub>* et *Bacillus.subspI<sub>3</sub>* en présence de PNT (respectivement 18.40% and 32.40%). Le *Bacillus.subspI<sub>1</sub>* a montré un pourcentage d'infection relativement plus

élevé en conditions PNT qu'en conditions complexe céréale tandis que les *Bacillus.subspI<sub>4</sub>* et *Bacillus.subspI<sub>6</sub>* ont montré des pourcentages élevés avec le complexe céréale (respectivement 9.85% et 7.75%). *Bacillus.subspI<sub>5</sub>* a montré un pourcentage plus élevé en condition PNT. Les résultats ont aussi révélé que la source de phosphore a une interaction positive sur l'infection mycorrhizienne. Mais cette infection est beaucoup plus basse avec le complexe céréale.

Table XII. Pourcentage moyen de l'infection racinaire du maïs par les champignons mycorrhiziens indigènes, après deux mois de croissance en présence ou absence du PNT ou du Complexe céréale.

MSP	Pourcentage of infection (%)		
	San PNT	Avec PNT	Avec Complexe céréale
<i>Bacillus.subspI<sub>1</sub></i>	5,85	0,30	2,10
<i>Bacillus.subspI<sub>2</sub></i>	1,75	18,40	1,35
<i>Bacillus.subspI<sub>3</sub></i>	2,72	32,40	1,15
<i>Bacillus.subspI<sub>4</sub></i>	2,61	1,05	9,85
<i>Bacillus.subspI<sub>5</sub></i>	0,62	2,50	0,74
<i>Bacillus.subspI<sub>6</sub></i>	1,11	1,80	7,75
Témoin	2,02	2,40	1,00

MSP = Microorganismes solubilisant le Phosphate

## IV. Discussion

La sélection des microorganismes basée sur leur capacité à dissoudre le PNT et la quantité de P soluble produit a permis de retenir 6 isolats qui ont été classées suivant leur efficacité de dissolution du PNT en milieu solide qui variait de 114,29% à 300% de P dissout. En étudiant des lignées de *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus megaterium* et *Azospirillum spp.*, Komy (2005) a obtenu des valeurs de 128% à 150% portant sur la solubilisation *in vitro* du phosphate de calcium. Malaiah *et al.* (2007) qui ont pu mettre en évidence l'efficacité de solubilisation du phosphate tricalcique sur milieu solide gélosé de 5 isolats parmi 46

rhizobiums était de l'ordre de 33% à 150%. En milieu liquide, le dosage du phosphore soluble a permis de mettre en évidence une capacité de dissolution du phosphate par les 6 souches de bactéries sélectionnées variant de 148,6 à 332,2 mg de P par gramme de PNT. Selon Babana (2003), certaines bactéries peuvent ne pas avoir une capacité de dissolution des PN en milieu solide et en avoir en milieu liquide. Nous n'avons pas observé de tels cas puisque toutes les souches ont solubilisé aussi bien en milieu solide qu'en milieu liquide. Il faut signaler cependant que les bactéries : *Bacillus subtilis I<sub>5</sub>*, *I<sub>1</sub>* et ont donné les meilleurs résultats en milieu liquide (respectivement 332,20 mg de P, 331,20 mg de P et 318,50 mg de P/g de PNT) tandis que les *Bacillus*

*subtilis* I<sub>4</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub> ont montré une capacité de solubilisation satisfaisante dans les deux types de milieu (respectivement 150% et 115%) comme efficacité de solubilisation du PNT en milieu solide ; 251,80 mg de P et 148,60 mg de P/g de PNT en milieu liquide. Il a été noté que le *Bacillus*.subspI<sub>5</sub> a montré une forte activité de solubilisation en milieu liquide (310,60 mg de P/g de PNT). Nautiyal (1999), Babana (2003) et Komy (2005) ont suggéré qu'avant de sélectionner les microorganismes à utiliser comme inoculums, il est toujours utile de recourir aux types de milieu, solide et liquide.

De l'analyse des résultats des essais au champ des deux années 2007 et 2008, il a été retenu que la fertilisation phosphatée et l'inoculation avec certains MDP ont significativement influencé les paramètres de croissance du maïs tels que la taille après 30 jours de croissance, la biomasse sèche et le volume racinaire après 60 jours de croissance. L'effet de l'inoculation en présence du PNT a entraîné une augmentation moyenne de la taille des plants de maïs Sotubaka de 18,88 cm par rapport au témoin et de 24,16 cm en présence du Complexe au cours des 30 premiers jours de croissance. Ceci indique que la fertilisation phosphatée et l'inoculation ont un effet positif sur la taille pendant après 4 semaines de croissance. Ces résultats sont concordants avec ceux de Rock *et al.* (1996), qui ont rapporté que certains microorganismes tels que *Enterobacter* sp., *Pseudomonas* sp., et *Serratia* sp. sont efficaces dans la solubilisation des phosphates inorganiques utilisés pour la culture du maïs ; Babana et Antoun (2005), ont montré que l'inoculation avec les microorganismes en présence de la fertilisation phosphatée influence significativement la taille du blé après 8 semaines de croissance, Glick (1995), a également montré que les bactéries rhizosphériques peuvent accélérer la croissance des plantes par différents mécanismes parmi lesquels la dissolution des phosphates insolubles dans le sol.

Les espèces végétales, de même que les variétés d'une même espèce, peuvent avoir des comportements différents vis-à-vis des

microorganismes du sol. C'est ainsi que nous avons noté que la fertilisation phosphatée en présence de l'inoculation a augmenté le volume racinaire de 23 cm<sup>3</sup> en condition PNT et 7 cm<sup>3</sup> en condition de complexe céréale par rapport au témoin non inoculé. Hinsinger et Gilkes (1997) ont mentionné que l'efficacité agronomique maximum des phosphates sur les cultures se traduit partiellement par la nature acidifiante des sols et la grande densité racinaire. Une densité racinaire élevée facilite l'exploitation d'un volume de sol plus grand pour le phosphore à cause de la présence d'un nombre élevé de fines racines par unité de volume de sol.

Quant à la production de la matière sèche, l'inoculation en présence du PNT a occasionné un gain de rendement grain (kg/ha) de 12,33 % par rapport au complexe céréale et 42,72 % par rapport au traitement sans phosphore. De même, des gains de 8,87 % et 23,51 % ont été enregistrés pour la biomasse sèche après 60 jours de croissance ; 12,28 g et 31,55 g pour le poids de 1000 grains. Donc, il a été observé que l'inoculation en présence du PNT a amélioré le rendement grain/ha et la biomasse sèche à l'hectare par rapport au complexe céréale et sans phosphore, sans inoculation. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Hameeda *et al.*, 2006 qui ont rapporté qu'une expérimentation sur 5 lignées de bactéries ayant le pouvoir de dissoudre le phosphate ont causé l'augmentation de la production de la biomasse sèche du maïs de 20 à 40 %. Piex *et al.*, (2000) ont relevé un résultat similaire sur l'orge inoculé avec la lignée de rhizobium (*Mesorhizobium mediterraneum* PECA21) en présence du phosphate insoluble. Chung *et al.* (2005) ont formulé que l'addition du phosphate insoluble au sol inoculé avec les MDPaugmentesignificativement la production de matière sèche des plantes cultivées de 4 à 18 % ; Khan *et al.* (2002) ont rapporté que le rendement de la tomate a significativement augmenté de 23 % lorsqu'elle a été inoculée avec *Aspergillus awamori*, un champignon solubilisateur des phosphates.

En 2007, après 30 et 60 jours de croissance des plants de maïs, l'inoculation avec les bactéries

dissolvant le PNT a significativement augmenté l'absorption du phosphore par les plants de maïs en présence du PNT. L'absorption du phosphore a été plus importante chez Sotubaka au champ. Une sécheresse survenue au moment de la formation des épis n'a pas manqué d'affecter les rendements. En année 2008, l'application de l'inoculation en présence de la fertilisation phosphatée sur la même variété Sotubaka a montré une augmentation de la teneur en phosphore des grains (kg/ha) en présence du PNT de 25,11% par rapport au témoin non inoculé et 13,28% en présence du complexe ; 54,57% et 10,92% pour la biomasse. Cette même inoculation en présence du PNT a occasionné un gain de teneur en phosphore des grains (kg/ha) de 25,39% par rapport au complexe céréale sans inoculation et 78,88% par rapport au traitement sans phosphore sans inoculation ; 13,17% et 102,40% pour la biomasse sèche à l'hectare. Ces résultats sont concordants avec ceux obtenus par Gaur (1990) ; Piex *et al.*, (2000) chez l'orge. Ceci nous a permis de dire que le maïs inoculé en présence du PNT peut produire des rendements grains (kg/ha), de biomasse sèche (kg/ha) et leur contenu en phosphore (kg/ha) comparables à ceux produits par le complexe céréale.

Il y a une bonne interaction entre les bactéries rhizosphériques et les champignons mycorrhiziens indigènes en présence de PNT. Les résultats ont aussi révélé que la source de phosphore a une interaction positive sur l'infection mycorrhizienne. Mais cette infection est beaucoup plus faible avec le complexe céréale. Selon Bolan et Robinson (1987) ; Sylvia (1992) ; Frosard *et al.* (1995) ; Lange and Vlek (2000) ; Brundrett (2002) ; la mycorrhization des racines augmente l'absorption du phosphore, comparée à celles non mycorrhisées (Bolan et Robinson, 1987) ; Manjunath *et al.* (1992) ont conclu que l'efficacité des mycorrhizes est plus élevée

en condition de faible solubilité des engrais comme le phosphate naturel.

## V. Conclusion

Ce travail a montré que le PNT disponible localement peut être utilisé par les agriculteurs maliens pour la production de maïs et peut avoir un rendement grain kg/ha comparable à celui obtenu avec les engrais phosphatés du genre complexe céréale, l'engrais chimique importé à des coûts élevés (6000 FCFA le sac de 50 kg de PNT contre 18 000 FCFA le sac de 50 kg de complexe céréale). L'inoculation avec les souches de *Bacillus subtilis* dissolvant le PNT peut améliorer l'absorption de P par la plante de maïs et la colonisation des racines par les champignons mycorrhiziens indigènes. Il a été constaté que toutes les souches de *Bacillus* sélectionnées produisent des substances favorisant la croissance et la protection de la plante qui leur confère des caractéristiques PGPR ou d'agents régulateurs de la croissance et de la production de plante. Ceci leur permettra d'être utilisés dans l'agriculture comme des bio-inoculants, capables de promouvoir la croissance, la production et la protection des cultures en plus de leur capacité de dissoudre le PNT. Pour que le PNT soit économiquement rentable pour les agriculteurs, les travaux futurs doivent être orientés vers le développement des techniques de production d'inoculum et d'inoculation simples et peu coûteuses pour les agriculteurs, d'une part et, d'autre part, le développement des techniques industrielles de production et d'inoculation pour une utilisation du PNT à grande échelle. Des essais au champ dans les différentes zones agroécologiques du Mali sont nécessaires pour tester l'efficacité de dissolution du PNT par ces bactéries rhizosphériques dans différents types de sols et en présence de différentes communautés microbiennes indigènes.

## VI. Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants aux institutions suivantes qui ont aidé techniquement et financièrement dans ce travail : l'Institut d'Economie Rurale (IER) du Mali, l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) et le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et de Génie du Canada. Ils sont également reconnaissants aux techniciens de laboratoire et de terrain, Messieurs Bakary Samaké, Djibrilla Doumbia et Bakary Konaté qui ont contribué aux travaux de laboratoire et à la conduite des parcelles d'essais.

## VII. Bibliographie

- Babana A. H., 2003. Effect of Tilemsi phosphate rock-solubilizing microorganisms on phosphorus uptake and yield of field-grown wheat (*Triticum aestivum* L.) in Mali. *Plant and soil* 0 : 1-8.
- Babana A. H., Antoun H., 2005. Biological system for improving the availability of Tilemsi rock for wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivated in Mali. *Nutrient cycling in agroecosystems*. 72: 147-157.
- Bagayoko M. & Coulibaly B.S., 1995. Promotion and evaluation of Tilemsi phosphate rock in Mali agriculture. In H. Gerner & A.U. Mokwunye, eds. *Use of phosphate rock for sustainable agriculture in West Africa*, pp.77-83. *Miscellaneous Fertilizer studies N° 11* Muscle Shoals, USA, IFDC
- Bationo A., Ayuk E., Ballo D. and Koné M., 1997. Agronomic and economic evaluation of Tilemsi phosphate rock in different agroecological zones of Mali. *Nutrient Cycling Agrosyst.* 48, 179-189.
- Bolan, N. S. & Robson, D., 1987. Effect of vesicular-arbuscular mycorrhiza in the availability of iron phosphate to plants. *Plant Soil*. 90: 401-410.
- Brundrett M.C., 2002. Co-evaluation of roots and mycorrhiza of land plants. *New. Phyt.*, 154: 275-304.
- Chabot R., Antoun H. and Cescas M. P., 1996. Growth promotion of maize and lettuce by phosphate-solubilizing *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli*. *Plant and Soil* 184, 311-321.
- Chung H., Park M., Maghaiyan M., Seshadri S., Song J., Cho H., Sa T., 2005. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from the rhizosphere of crop plants of Korea. *Soil biology and biochemistry*. 37: 1970-1974.
- Dey B.K., 1988. Phosphate solubilizing microorganisms in improving fertility status of soil. In : Sen, S.P., Palit, P. (Eds). *Biofertilizers potentialities and problems*. *Plants physiology Forum*, Naya Prokash. Calcutta. pp. 237-248.
- Frossard E., Brosard M., Hedley M.J. & Metherell A., 1995. Reaction controlling the cycling of P in soils. In H. Tiessen, ed. *Phosphorus in the global environment*, pp. 104-141. New York, USA, John Wiley & sons.
- Gaur A.C., 1990. Phosphorus solubilizing microorganisms as biofertilizers. New Delhi, Omega Scientific Publ. pp. 176.
- Glick B.R., 1995. The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Can. J. Microbiol.* 41: 109-117.
- Hameeda B., Harini G., Rupela O.P., Wani S.P., Gopal Reddy, 2006. Growth promotion of maize by phosphate-solubilizing bacteria isolated from compost and microfauna. *Micobiological Research* 163 : 234-242.
- Hinsinger P. & Gilkes R.J., 1997. Dissolution of phosphate rock in the rhizosphere of five plant species grown in an acid, P-fixing substrate. *Geoderma*, 75: 231-249.
- Khan M.R., Khan M.S., 2002. Effect of root-dip treatment with certain phosphate solubilizing microorganisms on the fusarial wilt of tomato. *Bioresource technology*, 35: 213-215.
- Komy H.M., 2005. Co-immobilisation of *Azospirillum lipoferum* and *Bacillus megaterium* for successful Phosphorus and nitrogen Nutrition of Wheat Plants. *Food technol. Biotechnol.* 43 (1) p. 19-27.
- Laboratoire Sol-Eau-Plante (Labosep), IER., 2008. Analyse physico-chimique du sol de la sous-Station de Recherche Agronomique de Sotuba.
- Lange Ness R. & Vleck, P.L.G., 2000. Mechanism of calcium and phosphate release from hydroxy-apatite by mycorrhizal hyphae. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 949-955.

- Mallaiah K.V, Sridevi M., 2007. Phosphate solubilization by rhizobium strains. *Indian J. Microbiol* 49: 98-102.
- Manjunath A. & Habte M., 1992. External and internal P requirement of plant species differing in their mycorrhizal dependency. *A. Soil Res. Rehab.* 6: 271-284.
- Nautiyal C. S., 1999. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. *FEMS Microbiol. Lett.* 170 : 265-270.
- Olsen S.R., and Sommers L.E., 1982. Phosphorus. pp. 403-427, in A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney, eds. *Methods of Soil Analysis. Part 2.* 2<sup>nd</sup> ed. American Society of Agronomy. Madison. WI.
- Philips J. M. et Hayman D. S., 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal for rapid assesment of infection. *Trans.Br. mycol. Soc.* 55 : 156-161.
- Piéri C., 1989. Fertilité des terres de savanes, bilan de 30 ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Ministère de la coopération et IRAD-IRAT, 444p
- Peix A., Rivas-Boyer A-A, Mateo P.F., Rodriguez Barrueco C., Martinez-Molinari E., Velazquez E., 2000. *Soil Biology & Biochemistry*, 33: 103-110 (2001).
- Richardson A. E., 2001. Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. *Aust. J. Plant Physiol.* 28, 897-906.
- Rock Chabot, Hani Antoun, Joseph W. Kloepper and Chantal J. Beauchamp, 1996. Root colonization of maize and lettuce by Bioluminescent *Rhizobium leguminosarum* biovar phaseoli. *Applied and environmental. Microbiology*, 1996, pp. 2767-2772.
- Rodriguez H. and Fraga R., 1999. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotech. Adv.* 17, 319-339.
- Sacko O., 2006. (Thèse de Doctorat) : Utilisation d'arbres à usage multiple pour la valorisation des phosphates naturels africains par les champignons endomycorhiziens.
- SAFGRAD (Semi-arid Food Grain Research And Development), 1985. Rapports annuels. Institut d'Economie Rurale (IER), Mali.
- SAS Institute Inc., 1990. SAS procedure guide version 6 edition, SAS Institute Inc, Car, NC 705 p.
- Singh S., Kapoor KK, 1994. Solubilisation of insoluble phosphates by bacteria isolated from different sources. *Env. iron. Ecol.* 12, 51-55.
- SONAREM (Société Nationale de Recherche Minière), 1988. Le phosphate de Tilemsi : Quelques informations sur sa production industrielle et son utilisation en agriculture. Rapport projet phosphates 28 p.
- Strullu D. G., Perrin R., Planchette C. et Garbaye J., 1991. Les mycorhizes des arbres et des plantes cultivés. Lavoisier, Paris, 256p.
- Sylvia D.M., 1992. Demonstration and mechanism of improved phosphorus uptake by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. In F.J. Sikora, ed. *Future direction for agricultural phosphorus research*, pp. 31 – 34. Muscle Shoals, USA. National fertilizer and environmental research centre, TVA.
- Sylvia D.M. and Chelleni DO, 2001. Interaction among root-inhabiting fungi and their application for biological control of root pathogens. *Adv. Agron.* 73: 1-33.
- Tandon H. L. S., Cescas M.P. and Tyner E. H., 1968. An acid-free vanadate-molybdate reagent for the determination of total phosphorus in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32: 48-51.
- Watanabe F.S. and Olsen S.R., 1965. Test of an Ascorbic Acid Method for determining phosphorus in water and NaHCO<sub>3</sub> Extracts from soil. *Sci. Soc. Proc.* 29: 677-678.
- Whitelaw M.A., 2000. Growth promotion of plants inoculated with phosphate-solubilizing fungi. *Adv. Agron.* 69: 99-151.

# Recherche des causes et méthodes de lutte contre le phénomène de dessèchement du riz dans l'eau dans les zones rizicoles de l'Office Riz de Mopti

## Research of the causes and methods to control rice drying phenomenon in water in the rice cropping zones of the Office Riz de Mopti

Samaké O.\*, Maïga A. H., Cissé S., Doumbia Y., Traoré M. et Kane M.

Institut d'Economie Rurale (IER), B.P. 258, Rue Mohamed V, Bamako, Mali.

\* Adresse de contact : Centre Régional de Recherche de Mopti, B.P. 205, Mopti, Mali  
Tél. (223) 21 43 03 57 ; Cel. (223) 66 79 03 26

### Résumé

Dans la région de Mopti, la superficie des zones à submersion contrôlée est estimée à 40.000 ha. Les rendements moyens de ces zones sont faibles et ils varient de 800 à 1500 kg/ha par rapport aux potentiels de production des variétés vulgarisées qui sont de l'ordre de 2.500 kg/ha. Cette faiblesse de rendement est liée à plusieurs facteurs biotiques et abiotiques dont le phénomène de dessèchement du riz dans l'eau devenu une préoccupation majeure des populations de la région depuis 1980. Les plus importants dégâts causés par le phénomène ont été recensés en 1994 à Diambacourou avec plus de 85 % des superficies abandonnées. Pour résoudre ce problème, des études ont été entreprises dans la zone entre 1996 et 2007 en vue d'une part, de mieux connaître le phénomène et, d'autre part, de mettre au point des paquets techniques pouvant minimiser son incidence sur la production du riz. Ces études ont porté sur l'analyse profonde de la qualité des sols et des eaux d'irrigation, l'évaluation des molécules chimiques, des variétés de riz et des éléments nutritifs sur le phénomène de dessèchement du riz dans l'eau. Les résultats ont montré que les eaux d'irrigation sont de bonne qualité. L'utilisation de pesticides et de différentes variétés de riz n'a aucune incidence négative sur le phénomène. Seule, la pauvreté des sols en est la cause et la fertilisation en est l'unique solution.

**Mots clés :** Phénomène de dessèchement, riz, causes, méthodes de lutte, rendement, zone de submersion contrôlée.

### Abstract

In the region of Mopti, area of controlled submersion zones is estimated at 40.000 ha. Average yields are low and vary between 800 and 1.500 kg/ha compared to the production potentials of cultivated varieties of about 2.500 kg/ha. This decreased in yields is linked to many biotic and non biotic factors such as the phenomenon of rice withering in water which became a major concern of the populations of the region since 1980. The most important damages have been observed in Diambacourou in 1994 with more than 85 % of the area that were abandoned. To solve this problem, studies have been conducted in the zone to better understand the phenomenon and to develop techniques that can minimize the incidence of the phenomenon on rice production. These studies were based upon, deep analyses of the quality of soils and irrigation, evaluation of the effects of chemical molecules and different varieties of rice on drying phenomenon in water. Results showed that water used for irrigation is of good quality. The use of pesticide and of different varieties did not have any negative influence on the phenomenon. Soil poverty is the only cause and fertilisation remains the solution.

**Key words:** Drying phenomenon, rice, causes, control methods, yields, controlled submersion zones.

## I. Introduction

Au Mali, le riz flottant et d'immersion profonde est cultivé dans les plaines inondables, le long du fleuve Niger, dans les casiers aménagés (submersion contrôlée) et non aménagés (submersion libre) des régions de Ségou, Mopti, Gao et Tombouctou. Dans la région de Mopti, la superficie des zones à submersion contrôlée encadrées par l'Office Riz Mopti (ORM) est estimée à 40.000 ha (ORM, 1983). Les rendements moyens sont faibles et ils varient de 800 à 1500 kg/ha (ORM, 1999) par rapport aux potentiels de production de certaines variétés vulgarisées (DM16, KHAO) de l'ordre de 2.500 kg/ha. Cette faiblesse de production est due à de multiples problèmes, notamment l'insuffisance et l'irrégularité des pluies, l'arrivée tardive ou le retrait précoce de la crue, la pauvreté des sols, la pression des adventices, le faible pouvoir d'achat des producteurs pour se procurer des intrants et depuis un certain temps, le phénomène de dessèchement du riz dans l'eau.

Observé pour la première fois à Mopti dans le casier de Tiroguel en 1980 et à Diambacourou en 1981 deux ans après l'aménagement de ce casier, le phénomène se manifeste par un jaunissement de l'extrémité du limbe foliaire qui progresse vers la gaine. Au fur et à mesure de la progression du phénomène, les feuilles se dessèchent et meurent. À partir de cette période, le phénomène est devenu une préoccupation majeure des producteurs de la zone ORM. En cas de forte infestation, les tiges aussi se dessèchent et pourrissent dans l'eau. Les plus importants dégâts causés par ce phénomène ont été recensés en 1994 à Diambacourou où plus de 85 % des superficies ont été abandonnées (ORM, 1995). En 1995, sur les 137 ha semés, seulement 27 ha ont été récoltables (ORM, 1996).

À partir de 1983, des travaux de recherche ont été menés à la station de recherche sur le riz flottant et d'immersion profonde de Mopti et en milieu paysan en vue de comprendre et de proposer des méthodes de lutte contre le dessèchement du riz dans l'eau dans les casiers rizicoles de l'Office Riz Mopti. Les

activités menées ont porté sur le criblage variétal et les études de l'influence de la lame d'eau sur le comportement des espèces de riz (*O. glabberima* et *O. sativa*) et de certaines molécules chimiques (furan et marshall) dans la protection phytosanitaire du riz. Ces travaux ont été interrompus avec l'arrêt des activités de l'ADRAO au Mali en 1987. Les résultats obtenus de ces différents travaux n'ont pas permis d'élucider les causes réelles du phénomène. L'objectif de cette étude était de mieux connaître le phénomène et de mettre au point des paquets techniques pouvant minimiser son incidence sur la production du riz.

## II. Matériel et Méthode

De 1996 à 2005, des recherches ont été menées à la station de recherche agronomique de Mopti et en milieu paysan pour comprendre et proposer des méthodes de lutte contre le phénomène de dessèchement du riz dans l'eau. Les travaux ont porté sur le criblage variétal, les études de l'influence des molécules chimiques et de la fertilisation organo-minérale ainsi que sur les analyses de la qualité des sols et des eaux.

### 2.1. Evaluation des molécules chimiques sur le dessèchement du riz dans l'eau

Cette étude a été menée de 1996 à 1998 dans les casiers rizicoles de Diambacourou et de Ouro-Néma pour étudier l'efficacité de trois molécules chimiques dans la lutte contre le dessèchement du riz. Ces deux casiers choisis sont les plus affectés à l'ORM. Dix paysans collaborateurs (5 à Diambacourou et 5 à Ouro-Néma), propriétaires de champs attaqués, ont été choisis sur la base du volontariat pour conduire les tests. Les traitements étaient composés de trois molécules chimiques (thimet, counter, furadan 2G et un témoin sans traitement).

Le dispositif expérimental était le bloc complet randomisé en 10 répétitions où chaque paysan constituait une répétition. La

superficie parcellaire était de 20 m<sup>2</sup> (5 m x 4 m). Les trois molécules chimiques étaient appliquées à la dose de 25 kg/ha. Le furadan 2G était apporté au semis tandis que le thimet et le counter étaient appliqués juste avant la crue. Le riz (*Oryza sativa*, var. DM16) était semé en lignes continues espacées de 30 cm. Pour palier d'éventuelle carence minérale, le phosphate d'ammoniaque était apporté au semis à la dose de 100 kg/ha et l'urée à 100 kg/ha, une semaine avant la crue. Les parcelles ont été régulièrement désherbées pour éviter des compétitions pour les nutriments entre le riz et les mauvaises herbes.

## 2.2. Evaluation variétale dans la lutte contre le phénomène de dessèchement du riz dans l'eau

Parallèlement à l'évaluation des molécules chimiques, le comportement au phénomène de dessèchement de sept variétés de riz d'espèces *Oryza sativa* (DM 16, Khao Gaew), *Oryza glaberrima* amélioré (SMMG88-8-1-1, SMMG88-13-1, SMMG88-15-2, MUT93-2-1) et *Oryza glaberrima* traditionnel (Gorbal) a été étudié entre 1996 et 1998 dans les parcelles attaquées à Diambacourou et Ouro-Néma. Le dispositif utilisé était le bloc de Fisher randomisé en 10 répétitions où la parcelle de chaque paysan constituait une répétition. La superficie parcellaire était de 15 m<sup>2</sup> (3 m x 5 m). Le riz était semé en lignes continues espacées de 30 cm. Le phosphate d'ammoniaque et l'urée ont été uniformément apportés sur toutes les parcelles à la même dose que dans l'essai sur les molécules chimiques. Toutes les parcelles étaient régulièrement désherbées.

## 2.3. Evaluation des formules de fertilisation dans la lutte contre le phénomène de dessèchement

L'essai était conduit dans des pots de végétation à la station de recherche agronomique de Mopti en 2000 et 2001 sur des échantillons de sols infestés et non infestés par le phénomène de dessèchement du riz dans l'eau. Les sols infestés sont ceux sur lesquels le dessèchement

a été constaté l'année précédant cette étude tandis que les sols non infestés sont ceux sur lesquels aucun phénomène de dessèchement n'a jamais été observé. Ces échantillons ont été prélevés dans les casiers de Ouro-Néma et de Diambacourou en zone ORM à 20 cm de profondeur et transportés dans la serre à la station de recherche agronomique de Mopti. Ensuite, ils ont été séparément séchés à l'air libre, émottés pour les ameublir, pesés et repartis en 10 kg/pot en fonction du niveau d'infestation. Un échantillon homogène de sol de 100 g/pot a été prélevé pour constituer un échantillon représentative de 1 kg par type de sol (infesté et non infesté) et par casier destiné à la détermination de la teneur en N, P, K, S, Mg, Al, Ca, Fe, Zn, Cu, Mn, B, le pH et le pourcentage de base de saturation.

Le dispositif expérimental était des blocs complets randomisés en 3 répétitions. Les traitements étaient constitués d'une combinaison de deux facteurs dont le premier facteur était deux (2) niveaux d'infestation (sol infestés et non infestés) et sept (7) formules de fertilisation minérale (0-0-0-0-0-0 ou témoin sans engrais, N-P-K-S-B-Zn, N-P-K-S-B, N-P-K-S, N-P-K, N-P et N). Les doses apportées par pot étaient de 440 mg N, 203 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 66 mg K<sub>2</sub>O, 35 mg S, 4 kg B, 18 mg Zn. Ceci correspond aux doses appliquées à l'hectare de 100 kg N, 46 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 15 kg K<sub>2</sub>O, 8 kg S, 1 kg B et 4 kg Zn. Ces éléments ont été soigneusement appliqués au sol des pots correspondants sous forme d'urée, de phosphate d'ammoniaque, de complexe coton, de complexe céréale, de sulfate de potassium, de soufre et de zinc. Le phosphate d'ammoniaque, le complexe coton, le complexe céréale, le sulfate de potassium et le soufre ont tous été apportés au semis. Le zinc a été enfoui à la levée et l'urée a été appliquée en deux fractions (une moitié au tallage et l'autre moitié à l'initiation paniculaire). Chaque pot a été humidifié un jour avant le semis du riz.

Pour minimiser d'éventuelles attaques de nématodes et d'insectes, le furadan 2G a été appliqué dans tous les pots à la dose de 25 kg/ha, soit 110 mg/pot avant l'humidification. La variété DM16 qui est celle vulgarisée dans les

casiers en zone basse et moyenne était utilisée dans cette expérimentation. Le semis a été effectué à 3 poquets/pot après un arrosage abondant à raison de 5 graines par poquet. Les plants ont été arrosés une fois par jour jusqu'au stade 100% tallage du riz. À partir de 33 jours après les semis, les sols ont été entièrement submergés jusqu'à la phase de la maturation pour imiter les conditions réelles de culture dans les casiers. Cette submersion a été réalisée à 10 cm de profondeur. Le premier sarco-binage a été fait à sec 15 jours après la levée, le deuxième 20 jours après le premier et le reste à la demande après la mise en eau.

#### **2.4. Effet de la fertilisation organo-minérale en milieu paysan**

Sur la base des résultats obtenus en vase de végétation dans la serre en station, un test a été réalisé en 2005 et 2007 dans les casiers infestés pour évaluer le rôle de la fertilisation organo-minérale dans la lutte contre le phénomène de dessèchement du riz dans l'eau. Les casiers concernés étaient ceux de Diambacourou et de Ouro-Néma. L'approche participative était privilégiée dans tous les processus. Les traitements comparés étaient le témoin ou pratique paysanne sans fertilisation (NF), 100 kg/ha DAP + 100 kg/ha urée (FM), 2 t/ha de fumier + 50 kg/ha DAP + 100 kg/ha Urée (FO + FM) et 5 t/ha de fumier (FO). Le DAP et la fumure organique ont été appliqués au labour avant semis et hersage tandis que l'urée a été apportée à la volée suivant la pratique courante du paysan.

Les traitements ont été arrangés dans un dispositif de bloc complet randomisé chez quatre paysans collaborateurs par casier où chaque paysan constituait une répétition. La superficie de la parcelle élémentaire était de 625 m<sup>2</sup>. Pour éviter toute compétition du riz et des adventices pour les éléments nutritifs, le désherbage a été régulièrement assuré à sec 15 et 30 jours après la levée et dans l'eau juste après la fermeture des ouvrages.

#### **2.5. Détermination des caractéristiques physico-chimiques des sols et des eaux dans les casiers**

##### **2.5.1. Qualité des sols**

Les activités du contrôle de la qualité de l'eau se sont déroulées dans les casiers de Diambacourou et de Ouro-Néma en mars 2005, après un inventaire sommaire des parcelles infestées et non infestées en décembre 2004. Au niveau de chaque casier, deux fosses de 1,5 m de longueur, de 1 m de largeur et de 0,8 m de profondeur ont été ouvertes, une, dans la parcelle infestée et l'autre, dans celle non infestée. Au total, 6 fosses ont été ouvertes, à raison de 2 par casier. Dans chaque fosse, des échantillons de sols ont été collectés à des profondeurs différentes pour la détermination du pH, du taux de la matière organique et des éléments minéraux. Les profondeurs de prélèvement ont été de 0-20 cm, de 20-40 cm, de 40-60 cm et >60 cm.

##### **2.5.2. Qualité des eaux**

Deux séries de prélèvements ont été effectuées. La première s'est déroulée entre le 2 et le 5 octobre 2005, vers la fin du remplissage des casiers et, la seconde, 35 jours après la fermeture des ouvrages entre le 18 et le 21 novembre 2005. Les prélèvements ont été effectués au niveau de la prise d'eau, dans les parcelles infestées et dans celles non infestées.

##### **2.5.3. Données collectées et méthode d'analyse**

Les paramètres mesurés ont porté sur la qualité des eaux et des sols, le nombre de talles à 40 jours après la levée (JAL), le nombre de plants et de panicules attaqués par mètre carré à maturité physiologique, le taux d'infestation par les foreurs de tiges et le rendement en paddy. La détermination de la qualité des eaux a concerné l'analyse du pH, de la température, de la conductivité et de l'oxygène dissous. Les analyses des sols ont porté sur le pH, le taux de la matière organique et des minéraux (N,

P et K). Le nombre de plants desséchés par le phénomène et le nombre de panicules blanches ont été obtenus par simple observation visuelle et par comptage à la maturation pendant que le nombre de larves a été obtenu par dissection des plants attaqués. Les résultats ont été analysés par la méthode ANOVA (analyse de variance) pour déterminer la différence entre les traitements et le test de Duncan pour séparer les moyennes des traitements.

### 3.1. Effet des molécules chimiques sur le dessèchement du riz dans l'eau

Le Tableau I montre l'effet des molécules chimiques dans la lutte contre le dessèchement du riz dans l'eau dans les casiers de l'Office Riz Mopti. Les résultats indiquent que les applications des molécules chimiques n'ont eu aucune incidence significative sur le phénomène par rapport à la parcelle non traitée. Cependant, elles se sont traduites par une réduction sensible du taux d'infestation par les foreurs de tiges à la phase de maturation du riz de 21 % dans la parcelle témoin à 0,13-

0,14 % dans les parcelles traitées. Ces attaques, qui ont été de moindre importance, se sont manifestées par l'apparition des panicules blanches et par la présence des foreurs de tiges, notamment *Maliarpha* et *Chilo*.

Les plus fortes attaques, par le phénomène, ont été observées dans le casier de Ouro-Néma par rapport à celui de Diambacourou. Les taux des plants atteints à Ouro-Néma étaient 23 % dans la parcelle non traitée contre 22 % dans la parcelle traitée au furadan 2G, 23 % avec le Thimet et 21 % avec le Counter. À Diambacourou, les taux d'attaques correspondants ont été de 15 %, 14 %, 13 % et 13 %, respectivement.

L'application des différentes molécules chimiques n'a pas significativement affecté le rendement du riz paddy par rapport au témoin non traité (Tableau II). Les rendements moyens observés sur 3 années d'expérimentation dans les 2 casiers ont varié de 1.763 kg/ha dans les parcelles non traitées à 1.908 kg/ha dans les parcelles traitées. Les rendements obtenus ont été faibles en 1998 par rapport à 1996 et 1997 à cause du retard accusé dans l'installation des pluies et dans les semis.

Tableau I. Effets des molécules chimiques sur le nombre moyen de plants attaqués dans les casiers de Diambacourou et de Ouro-Néma, en zone Office Riz de Mopti

Molécules chimiques	Nombre moyen plants/m <sup>2</sup>	Nombre de plants atteints		
		Total/m <sup>2</sup>	Par le phénomène (%)	Par les foreurs (%)
Témoin	230	44	19	0,21 a
Thimet	245	44	18	0,14 b
Counter	245	45	18	0,14 c
Furadan	250	43	17	0,13 d
F-Test	NS	NS	NS	S
CV (%)	6,25	11,81	15,36	12,66

\* Les moyennes suivies d'au moins une lettre commune ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5%

**Tableau II.** Effets des molécules chimiques sur le nombre moyen de plants attaqués dans les casiers de Diambacourou et de Ouro-Néma, en zone Office Riz de Mopti

Molécules chimiques	1996	1997	1998	Rendement moyen kg/ha
Témoin	2230	2225	835	1763
Thimet	2360	2295	930	1862
Counter	2385	2375	830	1863
Furadan	2435	2360	930	1908
F-Test	NS	NS	NS	NS
CV (%)	14,15	12,46	21,11	11,50

### 3.2. Influence des différentes variétés sur le phénomène

Les résultats moyens de trois années d'étude sur le comportement de certaines variétés vis-à-vis du phénomène de dessèchement du riz dans les casiers de l'ORM sont consignés dans le Tableau III. L'analyse de ces résultats n'a montré aucune différence significative entre les traitements au seuil de 5%. Cette situation indique que toutes les variétés se sont montrées sensibles au phénomène. Cependant, une tendance à la baisse de 14,28% du nombre de plants attaqués a été observée avec le témoin locale Gorbali (*Oryza glaberrima*) par rapport à DM16 et Khao Gaew, qui sont tous deux, de

l'espèce *O. sativa*. Par ailleurs, des attaques des foreurs de tiges, notamment pendant la phase de maturation, ont été notées sur toutes les variétés avec de faibles taux d'infestation qui se situent entre 0,55% avec le témoin Gorbali et 0,63-0,64% avec DM16 et Khao Gaew.

Du point de vue de la production en grains, les résultats enregistrés ont révélé une différence significative entre les rendements moyens des sept variétés testées (Tableau IV). Toutes les variétés cultivées ont donné des rendements moyens nettement supérieurs à celui de Gorbali. Au niveau des deux sites (Figure 1), les niveaux moyens de production de toutes

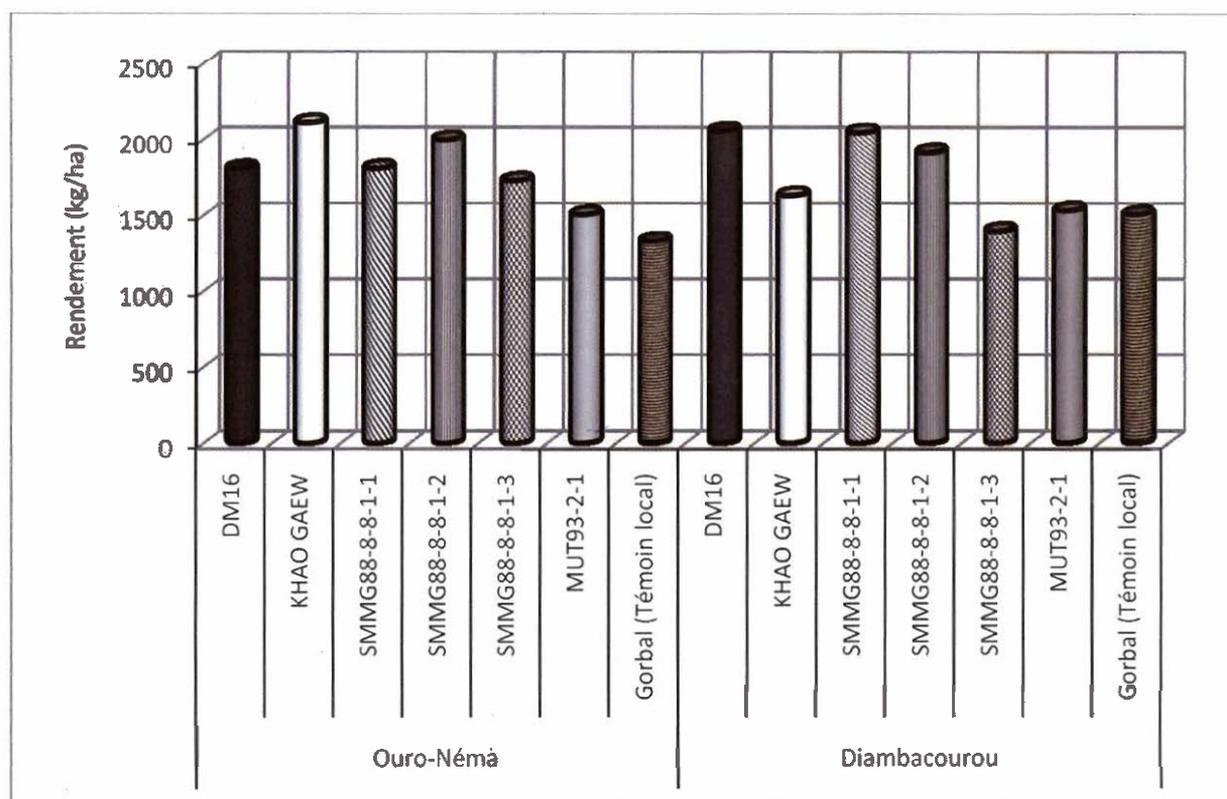
**Tableau III.** Influence des variétés sur le nombre moyen de plants attaqués dans les casiers de Diambacourou et de Ouro-Néma, en zone Office Riz de Mopti

Variétés	Nombre moyen plants/m <sup>2</sup>	Nombre de plants atteints (%)		
		Total/m <sup>2</sup>	Par le phénomène	Par les foreurs
DM16	191	16	30,25	0,63
KHAO GAEW	211	16	32,10	0,64
SMMG88-8-8-1-1	188	15	28,10	0,58
SMMG88-8-8-1-2	187	15	28,25	0,61
SMMG88-8-8-1-3	217	16	29,95	0,60
MUT93-2-1	193	15	31,05	0,57
Gorbali (Témoin local)	185	14	29,90	0,55
F-Test	NS	NS	NS	NS
CV (%)	17,27	14,19	14,92	10,37

**Tableau IV.** Effets des variétés sur les rendements moyens en riz paddy dans les casiers de Diambacourou et de Ouro-Néma, en zone Office Riz de Mopti

Variétés	1996	1997	1998	Rendement moyen kg/ha
DM16	2080 a*	2085 a	1625 b	1930 a
KHAO GAEW	2010 a	1715 b	1880 a	1868 a
SMMG88-8-8-1-1	1910 a	2305 a	1560 b	1925 a
SMMG88-8-8-1-2	1925 a	2365 a	1575 bc	1955 a
SMMG88-8-8-1-3	1580 b	1945 a b	1155 d	1560 b
MUT93-2-1	1325 bc	1620 bc	1605 b	1517 bc
Gorbal (Témoin local)	1240 c	1570 c	1435 c	1415 c
F-Test	S	S	S	S
CV (%)	21,10	18,40	16,32	18,09

\* Les moyennes suivies d'au moins une lettre commune ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5%

**Figure 1.** Effet de différentes variétés dans la lutte contre le phénomène de dessèchement du riz dans l'eau

les variétés utilisées sur les trois années d'expérimentation ont varié de 1.415 kg/ha avec le Gorbal, la variété locale à 1.930 kg/ha avec Khao Gaew, une variété introduite. Ces rendements sont jugés stables et acceptables,

comparés au rendement moyen de 1.180 kg/ha observé dans le système de riziculture de submersion contrôlée à Mopti entre les campagnes agricoles 2000/2001 et 2004/2005 (ORM, 2001-2005).

### 3.3. Effet des formules de fertilisation sur le phénomène

Les résultats d'évaluation, en pots de végétation, de l'effet des éléments nutritifs sur le comportement agronomique du riz, conduite en 2000 et 2001 à la station agronomique de Mopti, sur des échantillons de sols prélevés dans les casiers de Diambacourou et de Ouro-Néma, sont consignés dans le Tableau V. L'analyse de ces résultats n'a montré aucune différence significative entre le nombre moyen des plants récoltés et le poids de riz paddy

sur sols infestés et non infestés. Par contre, la fertilisation minérale a significativement amélioré le tallage (Photo 1) et la production du riz paddy par rapport au témoin non fertilisé. Les taux d'augmentation de poids paddy, enregistrés dans les pots fertilisés par rapport à ceux non fertilisés, ont été de 187,3% avec la formule de fertilisation N-0-0-0-0 et 328,5% N-P-0-0-0-0. L'addition d'autres éléments minéraux complémentaires tels que K, S, B et Zn n'a provoqué aucune augmentation notable du poids paddy par rapport à celle obtenue avec N-P. Ceci suggère

**Tableau V.** Influence des formules de fertilisation sur le comportement agronomique du riz sur sol sain et non attaqué dans les casiers de l'Office Riz de Mopti

Traitements	Nombre moyen de plants (talles/pot)	Poids moyen paddy (g/pot)
<b>Niveau d'infestation sol (NI)</b>		
Sol infesté	42	60,6
Sol non infesté	44	63,6
F-Test (P = 0,05)	0,142	0,216
<b>Formules de fertilisation (FF)</b>		
N-P-K-S-B-Zn (100-46-15-8-1-4)	51 a	75,1 a
N-P-K-S-B (100-46-15-8-1-0)	50 a	79,9 a
N-P-K-S (100-46-15-8-0-0)	50 a	75,6 a
N-P-K (100-46-15-0-0-0)	51 a	68,0 a
N-P (100-46-0-0-0-0)	51 a	72,4 a
N (100-0-0-0-0-0)	34 b	48,6 b
0-0-0-0-0 (témoin)	15 c	16,9 c
F-Test (P = 0,05)	0,004	0,003
<b>Interaction NI x FF</b>		
	0,428	0,361
CV (%)	13,97	16,52



**Photo 1.** Effet de différents éléments nutritifs sur le comportement végétatif du riz sur sol affecté (à gauche) et non affecté (à droite) de Diambacourou.

l'importance de l'azote et du phosphore dans la nutrition minérale du riz dans ces casiers infestés. Aucune interaction n'a été observée entre le niveau d'infestation des sols et la formule de fertilisation.

Dans le cadre de l'aspect phytosanitaire, le comptage et la dissection des plants à la récolte n'ont montré aucun signe d'attaque due aux foreurs de tige de riz sur sols infestés et non infestés et sur plants fertilisés et non fertilisés. Cette situation est probablement liée au traitement des sols au furadan 2G.

### 3.4. Effets de la fertilisation organo-minérale dans la lutte contre le dessèchement du riz

Les résultats des expérimentations conduites en milieu réel en 2005 et 2007, dans les casiers attaqués par le phénomène de dessèchement du riz dans l'eau, sont consignés dans le Tableau VI. L'analyse des résultats du comptage des plants atteints ont montré que le phénomène s'est manifesté à la maturité par l'étiollement des tiges et par un dessèchement des feuilles suivis de la mort du riz dans certains cas, ou par la formation incomplète des panicules et par le mauvais remplissage des épillets dans d'autres (Photo 2). Les attaques ont

**Tableau VI.** Effet des traitements sur le nombre moyen des plants attaqués par le phénomène de dessèchement à Mopti

Traitements	Nombre moyens de plants attaqués/ha			
	Total	Par le phénomène	Par les foreurs	Nombre moyen de larves
Pratique paysanne (NF)	55 633 a*	55 018 a	615 b	334 b
FO	17 096 b	16 004 b	1 185 a	785 a
FM	10 919 b	9 855 b	1 064 a	663 a
F + O	8 903 b	7 718 b	1 092 a	528 ab
Erreur Standard	6 474	6 333	141	164
F-Test (P = 0,05)	0,035	0,018	0,048	0,055
CV (%)	28,69	16 004	20,80	24,50-

FO+FM = Fumure organo-minérale (2 t/ha de fumier + 50 kg/ha DAP + 100 kg/ha urée) ;  
FO = Fumure organique (5 t/ha) ; FM = Fumure minérale (100 kg/ha DAP + 100 kg/ha urée).

\* Les moyennes suivies d'au moins une lettre commune ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5%



**Photo 2.** Images de la parcelle témoin non fertilisée présentant des symptômes du phénomène de dessèchement (à gauche) et de la parcelle ayant reçu 100 kg/ha DAP et 100 kg/ha d'urée (à droite)

été significativement plus réduites dans les parcelles fertilisées que dans celles non fertilisées (Tableau VI). Les taux moyens de réduction du nombre de plants attequés par rapport au témoin non fertilisé (NF) ont varié de 69,27% avec l'apport de 5 t/ha de fumier de ferme (FO), 80,37% avec l'application de 100 kg/ha de DAP au semis et de 100 kg/ha de l'urée au tallage (FM) et 84% avec l'utilisation de 2 t/ha de fumier de ferme combiné à 50 kg/ha de DAP au semis et de 100 kg/ha d'urée au tallage (FO + FM). Ces résultats confirment ceux obtenus dans les études d'évaluation en serre discutées dans le chapitre précédent et en milieu paysan par Doumbia *et al.* (2004) qui ont rapporté un taux moyen de réduction de l'attaque du phénomène d'environ 98% avec l'utilisation de la fertilisation minérale.

L'utilisation des différentes formes de fertilisation a provoqué une augmentation significative de rendements moyens de riz paddy (Figure 2). À Diambacourou, les augmentations moyennes de rendements paddy ont été de l'ordre de 88,9 avec FO, 117,9% avec FM et 126,6% avec la

combinaison de FM et FO. À Ouro-Néma, les accroissements de rendements ont été de 61,1%, 106,6% et 120,5% respectivement. L'effet du phénomène de dessèchement a été plus sévère dans tous les sites en 2005 et 2006. En 2007, il a été beaucoup plus atténué dans les casiers à cause des apports de fumures organiques et du parage des animaux dans les champs selon les paysans collaborateurs interrogés.

La Figure 3 et l'analyse de régression linéaire, établie entre les rendements moyens du riz paddy et les nombres moyens des plants attequés par le phénomène, montrent que la variabilité de rendement est fortement liée au nombre de plants attequés. L'augmentation du dégât causé par le phénomène entraîne une réduction notoire du rendement. Le coefficient de détermination ( $R^2 = 0,742$ ), obtenu de cette relation, a été hautement significatif ( $P < 0,01$ ). Ceci montre que 86,14% de la perte de rendement est causée par le phénomène observé dans les parcelles attequées où le niveau de fertilité a été beaucoup plus faible que dans les parcelles non attequées.

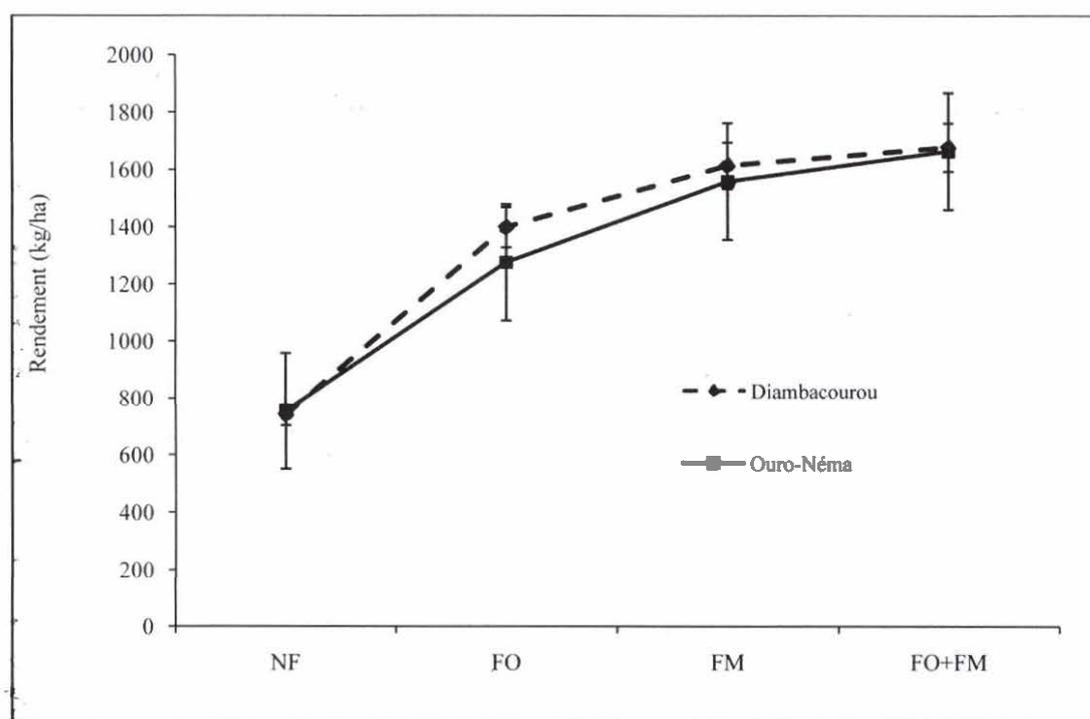


Figure 2. Influence de différentes formes de fertilisation dans la lutte contre le phénomène de dessèchement du riz dans les casiers de l'ORM.

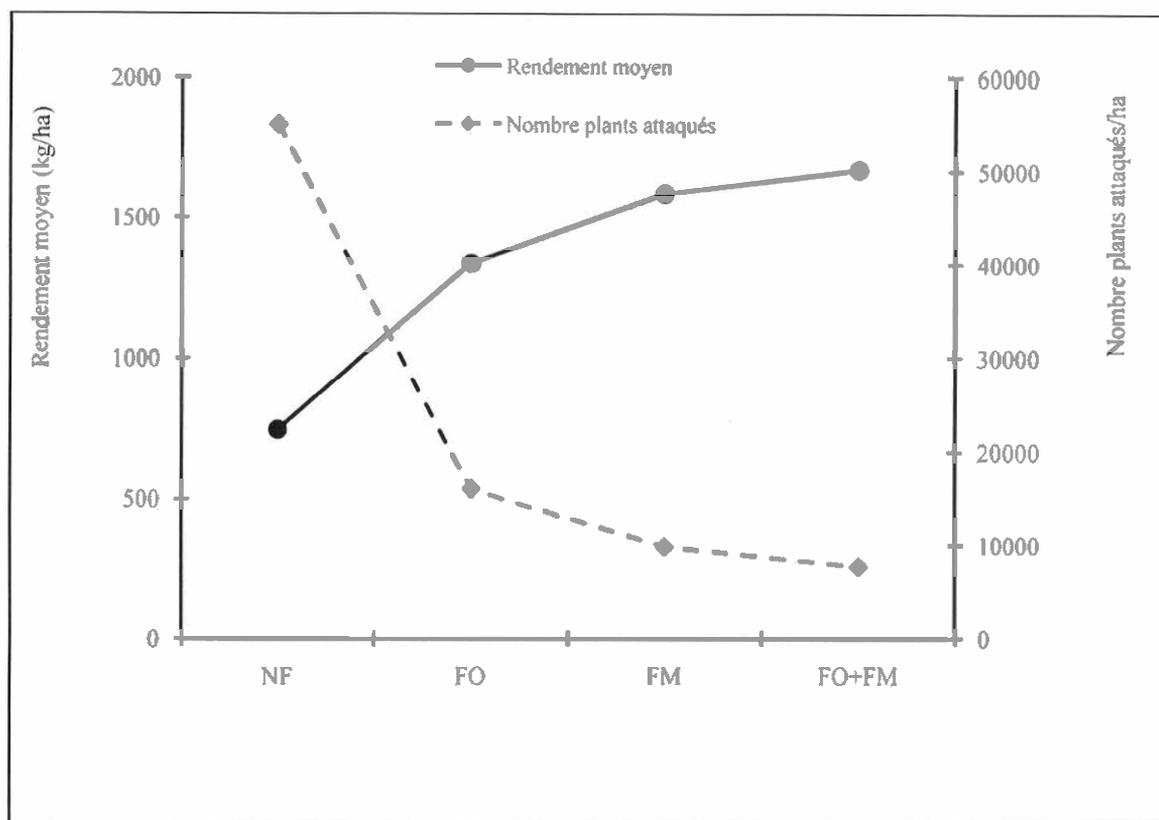


Figure 3. Relation entre le rendement moyen du riz paddy et le nombre de plants attequés par le phénomène de dessèchement du riz dans l'eau dans les casiers de l'Office Riz Mopti

### 3.5. Caractéristiques chimiques des sols et des eaux dans les casiers

#### 3.5.1. Qualité chimique des sols

Dans le domaine de la fertilité, les résultats d'analyse des échantillons de sols prélevés à différentes profondeurs, ont montré que tous les sols étudiés sont pauvres pour la riziculture avec une variabilité notoire d'un casier à un autre (Tableau VII). À Diambacourou, les teneurs en matière organique des sols de surface (0-20 cm) ont varié de 0,46% dans les parcelles attequées par le phénomène à 0,32% dans celles non attequées. À Ouro-Néma, elles ont varié de 0,51% dans les parcelles attequées à 0,38% dans les parcelles non attequées. La même tendance a été observée avec l'azote, le phosphore et le potassium assimilable. Une diminution des taux de ces différents

paramètres a été notée avec l'augmentation de la profondeur de l'échantillonnage.

Concernant le pH, aucune variation n'a été constatée entre les sols des parcelles attequées et non attequées dans les horizons de 0 à 20 cm de profondeur. Par contre, une légère augmentation du niveau de pH a été observée de l'horizon de surface (0 - 20 cm) à la couche 20 - 40 cm pendant qu'une stabilité a été enregistrée dans les horizons 40 - 60 cm et >60 cm (Tableau).

Dans l'ensemble, ces caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés au niveau des différents casiers ne présentent aucun danger pour la culture du riz. La carence minérale (N, P et K) peut être corrigée par un apport de fumure organique ou chimique.

Tableau VII. Caractéristiques physico-chimiques des sols dans les parcelles attaquées et non attaquées dans les casiers de Diambacourou et de Ouro-Néma.

Profondeur de prélèvement	Paramètres mesurés	Diambacourou		Ouro-Néma	
		Parcelle non attaquée	Parcelle attaquée	Parcelle non attaquée	Parcelle attaquée
0 – 20 cm	pH-eau	7,1	6,9	6,2	5,8
	Matière organique (%C)	0,46	0,32	0,51	0,38
	Azote (%N)	0,03	0,02	0,05	0,02
	Phosphore assimilable (mg/kg)	3,24	2,46	4,56	2,19
	Potassium assimilable (mg/100 g)	11,9	9,9	12,35	11,4
20 – 40 cm	pH eau	7,9	7,4	6,5	6,1
	Matière organique (%C)	0,39	0,26	0,44	0,28
	Azote (%N)	0,02	0,02	0,03	0,02
	Phosphore assimilable (mg/kg)	2,32	1,94	3,46	3,21
	Potassium assimilable (mg/100 g)	10,1	8,1	10,55	9,6
40 – 60 cm	pH eau	7,6	7,4	6,5	6,1
	Matière organique (%C)	0,21	0,1	0,2	0,1
	Azote (%N)	0,01	0,01	0,01	0,01
	Phosphore assimilable (mg/kg)	0,14	0,09	0,21	0,18
	Potassium assimilable (mg/100 g)	4,0	3,2	5,4	4,8
> 60 cm	pH eau	*	7,2	6,5	6,0
	Matière organique (%C)	*	0	0	0
	Azote (%N)	*	0	-	-
	Phosphore assimilable (mg/kg)	*	0	0	0
	Potassium assimilable (mg/100 g)	*	-	0	0

\* Roche-mère ; - Trace

### 3.5.2. Qualité physique et chimique des eaux d'irrigation

Les résultats d'analyse de la qualité de l'eau d'irrigation au remplissage ont montré que la teneur en oxygène dissous est faible dans les deux casiers (Tableau VIII). La conductivité varie de 40,8 à 49,9  $\mu\text{cm/s}$  pendant que le pH oscille autour de la neutralité.

À 30 jours après la fermeture des ouvrages d'admission de l'eau dans les casiers, une nette augmentation du niveau d'oxygène dissous et de la conductivité a été constatée dans les deux casiers. Les valeurs de la conductivité obtenues dans cette étude sont comprises entre 40 et 75  $\mu\text{S/cm}$ . Selon Laease (2009), les

valeurs de conductivité se situant entre 50 et 400  $\mu\text{S/cm}$  indiquent que l'eau est d'excellente qualité car sa concentration en ions de sels dissous est très faible. Les mêmes études ont également montré que le pH a très peu évolué de la période de remplissage jusqu'à 30 jours après la fermeture des ouvrages (JAF).

Les valeurs de ces différents paramètres mesurés (pH, conductivité, oxygène dissous, transparence et température) au remplissage et un mois après la fermeture des ouvrages ont été jugées bonnes et n'ont aucun effet néfaste sur le développement du riz.

Tableau VIII. Qualité de l'eau dans les casiers atteints au remplissage des casiers et 30 jours après la fermeture des ouvrages d'admission de l'eau.

Profondeur	Paramètres mesurés	Diambacourou		Ouro-Néma	
		Remplissage	30 JAF	Remplissage	30 JAF
45-60 cm (zone moyenne)	Heure	9h26	11h45	11h50	10h12
	pH	6,9	7,2	7,0	7,1
	Température (°C)	30,4	25,4	32,2	24,0
	Transparence (m)	> 1	> 1	> 1	> 1
	Oxygène dissous (mg/l)	0,22	1,54	0,21	1,62
	Conductivité (µs/cm)	49,5	66,8	41,5	52,7
20-25 cm (zone haute)	Heure	10h	12h40	12h26	9h02
	pH	6,9	7,5	7,0	7,4
	Température (°C)	30,5	25,5	32,5	21,7
	Transparence (m)	> 1	> 1	> 1	> 1
	Oxygène dissous (mg/l)	0,22	1,70	0,26	1,87
	Conductivité (µs/cm)	46,7	73,9	40,8	71,9
45-60 cm (Prise d'eau à l'ouvrage)	Heure	10h52	14h15	12h55	14h45
	pH	7,0	7,2	7,0	7,3
	Température (°C)	31,3	26,7	32,4	27,0
	Transparence (m)	0,54	0,41	0,54	0,40
	Oxygène dissous (mg/l)	0,3	1,6	0,29	1,6
	Conductivité (µs/cm)	43,5	51,5	42,5	52,1

#### IV. Discussion

Les résultats de cette étude ont prouvé que toutes les variétés se sont montrées sensibles au phénomène de dessèchement du riz dans l'eau. Aucune variété résistante au phénomène n'a été identifiée. Les essais ont été menés à partir de 1983 de l'ADRAO, au Mali, à la station de recherche sur le riz flottant et d'immersion profonde de Mopti et en milieu paysan pour comprendre et proposer des méthodes de lutte contre le dessèchement du riz dans l'eau. Ils ont porté sur le criblage variétal et les études de l'influence de la lame d'eau sur le comportement des espèces de riz (*O. glaberrima* et *O. sativa*) et de certaines molécules chimiques (furan et marshall) dans la protection phytosanitaire du riz. L'étude sur le comportement de 17 variétés des espèces *O. sativa* et *O. glaberrima* vis-à-vis

du dessèchement a montré que ce phénomène a été observé sur toutes les variétés. La manifestation a été moins prononcée sur les variétés *glaberrima* (Gorbal) que sur les variétés *sativa* notamment, BKN 6323, Adny-301 et Mali Sawn. Concernant les études de l'influence de la lame d'eau et des molécules chimiques, ces essais ont été interrompus avec l'arrêt des activités de l'ADRAO au Mali en 1987. Les résultats obtenus de ces travaux n'ont pas permis d'élucider les causes du phénomène de dessèchement du riz dans l'eau.

Les applications du furadan 2G, du Thimet et du Counter à la dose de 25 kg/ha entre 1996 et 1998 dans le cadre de la même étude sont également restées sans effet significatif sur le phénomène et le rendement du riz paddy dans les parcelles traitées par rapport à celles

non traitées. Cependant, des attaques de moindre importance causées par les foreurs de tiges notamment *Maliarpha* et *Chilo* ont été constatées. Ces résultats confirment ceux obtenus par Bouaré (1994) à la suite de la dissection des plants attaqués qui a révélé des galeries de *Maliarpha* et de *Chilo* à l'intérieur des tiges. L'application du furadan 2G au semis à la dose de 25 kg/ha, a provoqué une réduction de taux d'infestation du riz par les foreurs de tige de 20-25% par rapport au témoin non traité.

De même, l'analyse des eaux d'irrigation a montré que ces eaux sont de bonne qualité et qu'elles n'ont aucune incidence sur le développement normal du riz. Par contre, l'utilisation des différentes formes de fertilisation a provoqué une augmentation significative de rendements moyens de riz paddy de 61,1 à 88,9% avec FO, 106-117,9% avec FM et 120,5-126,6% dans les casiers de Diambacourou et de Ouro-Néma. L'analyse des échantillons de sols prélevés dans les zones concernées a montré que le niveau des éléments nutritifs contenus dans ces sols est faible. Par ailleurs, il a été constaté que les rendements moyens du riz, obtenus à Ouro-Néma, ont été plus élevés que ceux obtenus à Diambacourou à cause de la teneur des sols relativement élevée en éléments nutritifs. Les expérimentations conduites en milieux réels ont montré que l'application du DAP au semis et de l'urée au tallage permet de réduire significativement le nombre de plants desséchés et d'augmenter le rendement paddy de l'ordre de 450% par rapport au témoin non fertilisé. Les résultats des études en vase de végétation, réalisées en station, ont révélé que l'apport d'autres éléments nutritifs complémentaires comme K, S, B et Zn n'a pas significativement amélioré les rendements par rapport à ceux obtenus avec N et P.

Ces résultats sont conformes aux constats faits par les producteurs au cours des différentes visites paysannes dans les casiers de Ouro-Néma en 2005, de Soufourlaye en 2006 et de Diambacourou en 2007, qui ont unanimement noté que les parcelles ayant reçu de la fumure

(organique ou minérale) se sont nettement différenciées de la parcelle non fertilisée. Ils ont également constaté que les parcelles fertilisées présentaient des plants ayant des aspects physiologiques plus verts et plus développés avec des épis bien formés et bien remplis. Par contre, ils ont indiqué que, dans la parcelle non fertilisée, les plants de riz étaient chétifs, souvent, sans épis sinon avec des épis mal formés.

Un témoignage similaire a été rapporté par un producteur de Tongorongo qui a informé que le parcage des animaux transhumants a permis d'enrayer le problème dans sa parcelle. Ce constat a été confirmé par certains visiteurs dont un de Diambacourou qui a déclaré avoir résolu le phénomène de dessèchement avec l'apport du fumier de ferme dans son champ.

## V. Conclusion

Les résultats de cette étude ont montré qu'aucune variété résistante au phénomène de dessèchement n'a été identifiée. Par contre, l'application de molécules chimiques, dont le furadan 2G, le thimet ou le Counter à la dose de 25 kg/ha, s'est traduite par une réduction sensible du taux d'infestation par les foreurs de tiges de 21% dans la parcelle témoin à 0,13-0,14% dans celles traitées.

L'analyse des caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'irrigation, au remplissage des casiers, un mois après la fermeture des ouvrages d'admission, a révélé que cette eau est de bonne qualité et qu'elle ne présente aucun danger pour le développement du riz. Par contre, les résultats d'analyse des échantillons de sols prélevés dans les horizons de surface (0-20 cm) ont révélé une baisse notable des niveaux de matière organique qui ont varié de 0,51 dans les parcelles non attaquées à 0,32% dans les parcelles attaquées. La même tendance a été observée avec l'azote, le phosphore et le potassium assimilable.

Les résultats ont également montré que l'apport de K, S, B et Zn au riz n'a pas significativement amélioré le rendement grain

par rapport à celui de NP. Ceci suggère que l'azote et le phosphore sont déterminants dans la lutte contre le phénomène de dessèchement du riz dans l'eau. Les mêmes résultats ont été obtenus sur sols attaqués en milieu réel avec des apports du fumier de ferme au semis à la dose de 5 t/ha, du DAP à 100 kg/ha au semis suivi d'une application de l'urée au tallage avant la crue ou de 2 t/ha de fumier de ferme combiné à 50 kg/ha de DAP au semis et 100 kg/ha de l'urée avant la crue qui ont permis de réduire sensiblement le nombre de plants attaqués par le phénomène et de provoquer des accroissements significatifs de rendements paddy de l'ordre de 92 à 141% par rapport au témoin non fertilisé.

L'analyse de régression linéaire faite entre les rendements du riz paddy et le nombre moyen de plants attaqués par le phénomène de dessèchement montre que 92,9% de la baisse de rendement est lié à la pauvreté des sols.

#### IV. Bibliographie

- ADRAO, 1984. Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest ; Rapport annuel présenté au Comité National de la Recherche Agronomique, Bamako, Mali, p 33-45.
- Bouaré S., 1994. Etude préliminaire du phénomène de dessèchement du riz dans l'eau à Tongorongo. Rapport de mission. 3p ; SRA de Mopti.
- Doumbia Y., Traoré M. et Samaké O., 2004. Mise au point de méthodes de lutte contre le dessèchement du riz flottant et d'immersion profonde. Rapport de synthèse de l'Atelier de restitution des résultats et d'orientation de recherches sur le phénomène de dessèchement du riz dans l'eau dans les casiers rizicoles de l'Office Riz Mopti, tenu à Mopti du 8 au 10 Décembre 2004 ; Mopti, Mali. 14 pp.
- Laease, 2009. Groupe Technologiques de Santé. 5, Avenue Achille Maureau, Sorgues, Cedex Paris.
- ORM (Office Riz Mopti), 1995. Rapport annuel de la campagne 1994/95.
- ORM (Office Riz Mopti), 1999. Rapport annuel de la campagne 1998/99.

# Effet des systèmes de culture de légumes sur la teneur en carbone organique du sol en agriculture urbaine et périurbaine à Sikasso

## Effect of vegetable cropping systems on soil organic carbon content in urban and periurban agriculture of Sikasso

Konaté L.<sup>1</sup>, Hamadoun A.<sup>1</sup>, Sédogo P. M.<sup>2</sup>, Konaré H.<sup>1</sup>

E-mail : konat70@yahoo.fr

<sup>1</sup> Institut d'Economie Rurale, BP. 262 Bamako, Mali

<sup>2</sup> INERA/CNRST, 03 BP 7192 Ouagadougou 03 Burkina Faso

### Résumé

En agriculture, tant urbaine que périurbaine à Sikasso, les bas-fonds subissent, depuis quelques années, le poids des changements socio-économiques. En effet, la croissance démographique, la pauvreté des ménages, la diversification agricole, les facilités d'accès aux marchés de consommation y ont entraîné l'installation de cultures maraîchères intensives. Ces cultures intensives ont une influence certaine sur l'état du C organique des sols. Le site d'étude est la ceinture maraîchère de Sikasso. Le dispositif expérimental est en blocs dispersés où chaque paysan constitue un bloc. Des échantillons de sol ont été prélevés sur l'horizon 0-20cm au début et à la fin de l'étude pour l'analyse chimique. À chaque récolte il est fait un échantillonnage de la biomasse végétale, qui sera séchée en vue de la détermination du poids et l'analyse chimique de la matière sèche produite.

L'influence des systèmes de cultures sur la teneur en C organique des sols a été étudiée en faisant la différence entre les teneurs de carbone trouvées au début et celles mesurées à la fin de l'étude. Les sols concernés étaient ceux de bas-fonds, de types argileux dans la partie périurbaine et, argileux à limon-sableux dans la partie urbaine.

L'étude a révélé une diminution des teneurs en carbone organique aussi bien sur les parcelles ayant reçu de la fumure organo-minérale que sur celles ayant reçu uniquement des engrais minéraux. Cette baisse a été attribuée,

d'une part, aux exportations sans restitutions organiques et, d'autre part, aux effets du travail du sol. Donc, des apports organiques conséquents doivent être faits en vue d'une exploitation durable.

**Mots clés :** Sols, bas-fonds, systèmes de culture, légumes, teneur en carbone organique.

### Abstract

The lowlands in urban agriculture and periurban of Sikasso undergo since some years the burden of socioeconomic changes. Indeed demographic growth, poverty of households, agricultural diversification and the ease of access to consumer markets entailed the installation of intensive vegetable cropping. These intensive cultures will have a certain influence on the state of soils organic carbon. The site of survey is the market belt of Sikasso. The experimental device is in blocks dispersed where every farmer constitutes a block. Soils sampling was done on horizon 0-20 cm at the beginning and the end of the survey for chemical analysis. At every harvest, sampling of the plant biomass was done. The sample will be dried in order to determine the weight and the chemical analysis of the dry matter will be produced.

The influence of cropping systems on the C-organic content of soils was studied by making the difference between the carbon contents found at the beginning and those measured at the end of the study. Concerned soils were those from lowland of clayey types

in the periurban part, clayey to silt-sandy in the urban part.

The study revealed a decrease in organic carbon contents on plots receiving organo-mineral fertilizer as well as those that received only mineral fertilizers. This decline has been attributed, on the one hand, to exports without organic restitution and, on the other, to the effects of tillage. Therefore, consistent organic inputs must be provided for sustainable exploitation.

**Key words:** Soils of lowlands, systems of vegetable culture, content in organic carbon.

## I. Introduction

Le site maraîcher de Sikasso est une ceinture constituée de bas-fonds autour de la ville. Avec la demande de plus en plus croissante pour la consommation, les produits maraîchers revêtent une grande importance alimentaire et économique. En conséquence, ces bas-fonds font l'objet d'une exploitation continue durant toute l'année. Ils constituent (une opportunité économique) un espace stratégique pour les producteurs urbains. Ils offrent d'importantes possibilités de production et de diversification des cultures (Ahmadi, 1993). Les cultures maraîchères procurent des revenus substantiels pour les producteurs et constituent l'un des éléments essentiels constitutifs de l'alimentation des populations urbaines.

Les sols de ces bas-fonds sont limono-argilo-sableux ou argilo-sableux, avec une faible fertilité organique (Albergel *et al.*, 1993).

De nombreuses études ont été menées dans ces bas-fonds dans le cadre de l'amélioration de la productivité rizicole; cependant, l'évolution de l'état organique du sol, due aux pratiques agricoles, reste mal connue. Afin d'aider à produire de manière durable, il est important de disposer d'informations relatives à l'impact des systèmes de culture sur le statut organique du sol dans le but de proposer des techniques d'exploitation beaucoup plus appropriées (Koné *et al.*, 2008). C'est pourquoi, la présente étude se propose d'évaluer l'impact des systèmes de culture maraîchère sur l'évolution du carbone organique du sol.

## II. Matériel et Méthodes

### 2.1. Site d'étude

L'étude a été menée dans la zone urbaine et périurbaine de Sikasso. Ville carrefour, Sikasso est située dans la zone soudanienne. Le climat est caractérisé par l'alternance de deux saisons dont l'une est sèche et l'autre pluvieuse. Les hauteurs moyennes de pluies atteignent 1200 mm/an. Cette situation de bonne pluviométrie est renforcée par la présence de multiples cours d'eau qui alimentent des plaines inondables. Elle confère ainsi de grandes potentialités hydro-agricoles à la ville de Sikasso et à ses environs.

### 2.2. Choix des exploitations

À partir d'une enquête de base réalisée auprès de 108 exploitations agricoles ayant subi l'enquête socio-économique et ayant été classées en catégories A, B, D, H, J, M et N en fonction du niveau de revenu, de l'importance de la culture maraîchère, de l'importance de l'élevage et du nombre de champs en leur possession, treize (13) exploitations ont été retenues pour un suivi régulier de leur système de culture des légumes. Les éléments suivis ont été les exportations de biomasse, les apports et types d'intrants. Les systèmes de culture ont été étudiés selon les types de spéculations cultivées, le mode de succession, la période de culture et les techniques culturales (labour, buttage, irrigation et fertilisation).

#### 2.2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental était un bloc de Fisher avec 3 blocs dispersés où chaque paysan représente un bloc. Les parcelles élémentaires à l'intérieur de chaque bloc mesurent, en moyenne, 6 m<sup>2</sup> (4 m x 1.5 m). La fertilisation et les doses appliquées sont laissées aux soins du paysan. Les paramètres mesurés étaient les quantités des différents types de fumures apportées par parcelle élémentaire et les quantités de biomasse produite par m<sup>2</sup>.

### 2.2.2. Collecte des données

L'échantillonnage des sols a été fait à l'aide d'une tarière manuelle aux profondeurs de 0-20 cm en début et en fin d'étude. Les horizons 0-20 cm ont été les seuls pris en compte du fait que cette zone est la plus travaillée et la plus explorée par les racines des cultures maraîchères. Les échantillons ont été prélevés en trois points différents en parcourant chaque parcelle élémentaire suivant un tracé en W. Les prises d'échantillons ont été faites au début et à la fin de l'étude. Ces échantillons ont été séchés à l'air, moulus et passés au tamis de 2 mm (Dugain *et al.*, 1961).

À chaque récolte, le poids d'un mètre carré de biomasse a été pesé et 250 g prélevés comme échantillon. Les échantillons étaient séchés au soleil, puis dans une étuve à 65°C afin de déterminer le poids sec de la biomasse produite.

De la même façon, la fumure organique apportée par parcelle élémentaire a été pesée. À chaque apport de fumure, 250 g sont prélevés, séchés au soleil et à l'étuve à 65°C pour déterminer le poids de la matière organique sèche.

### 2.3. Analyses au laboratoire

L'analyse granulométrique des sols a été faite au Laboratoire Sol-Eau-Plante de l'IER, sis au Centre de Régional de Recherche Agronomique de Sotuba, au Mali. La méthode utilisée est la méthode simplifiée où l'on ne détermine que trois fractions dont le sable, le limon et l'argile (Keïta *et al.*, 1988). Après passage au tamis et séparation des sédiments à base de différence de dépôt dans l'eau, on obtient les 3 fractions suivantes :

2 - 0,05 mm → sable

0,05 - 0,002 mm → limon

< 0,002 mm → argile

L'analyse des paramètres chimiques suivants : Carbone organique, N, bases échangeables, capacité d'échange cationique a été réalisée au laboratoire de chimie des sols de l'ICRISAT

sis au Centre sahélien à Niamey. Selon ce laboratoire :

- la détermination du pH-eau a été faite dans une suspension de sol/eau suivant le rapport 1/2.5 par électrométrie au pH mètre à électrode de verre (Van Reeuwijk, 2002) ;
- la détermination du carbone organique a été faite par la méthode de Walkley et Black (Van Reeuwijk, 2002).

### 2.4. Analyses des données

Les données ont été traitées à l'aide du tableur Excel. Le logiciel SPSS a été utilisé pour la détermination des fréquences et des moyennes. Les moyennes ont été comparées par les tests de Newman-Keuls et Pearson au seuil 1 % et 5 %.

## III. Résultats

### 3.1. Les systèmes de culture

Dans la ceinture maraîchère de Sikasso, les caractéristiques physiques (notamment le régime hydrique) favorables des sols et les facilités d'accès aux marchés de consommation ont contribué au développement de systèmes de production intensifs et diversifiés. Le maraîchage qui vient en saison sèche après la riziculture et/ou la culture du maïs en saison de pluies, constitue un atout majeur pour la sécurité alimentaire et la diversification agricole.

En outre, les pratiques agricoles et les modes d'occupation des parcelles créent une certaine hétérogénéité des systèmes de culture dans la ceinture maraîchère. Ceci nous a amené à distinguer trois types de systèmes de culture dont un système périurbain (SP) et deux systèmes urbains (SU1 et SU2).

#### 3.1.1. Le système périurbain (SP)

Il était caractérisé par la culture de la pomme de terre, suivie de celle de la patate douce ou du chou pendant la saison sèche. À la fin du maraîchage et avant le début de la saison des pluies, les animaux viennent brouter sur les

parcelles. Les principales cultures pratiquées en contre-saison sont : la pomme de terre, la patate, le chou, la tomate, le piment, le haricot vert, l'oignon et l'aubergine. Dans ce système, où labour et buttage sont fréquents, le système est considéré comme étant en situation de labour (SL).

### 3.1.2. Le système urbain1 (SU1)

Il est un système de culture maraîchère continue sur toute l'année (tableau I) avec, comme principale culture, la laitue. Ce système de culture continu de laitue est un système en situation de travail superficiel (TS).

### 3.1.3. Le système urbain2 (SU2)

Il est un système de culture maraîchère suivi de la riziculture ou de la culture du maïs pendant l'hivernage. Les spéculations cultivées sont : la laitue, la carotte, le chou, la betterave, l'oignon, le persil, le céleri, l'épinard et le maïs. La laitue, à cause de son cycle court, est la spéculacion la plus cultivée en zone urbaine avec plus de 60 % des parcelles mises en valeur. Ce dernier système était aussi caractérisé par un travail manuel avec, quelques fois, le retournement que l'on pourrait assimiler à une situation de labour (SL).

## 3.2. Modes de gestion de la fertilité des sols

La ceinture maraîchère de Sikasso est exploitée par des producteurs à qui les terres sont prêtées par les propriétaires terriens. Ces derniers cultivent du riz ou du maïs pendant l'hivernage mais ils ne pratiquent pas de maraîchage de contre-saison.

En effet, les cultures hivernales profitent des arrières effets des fumures apportées aux différentes parcelles maraîchères en saison sèche. C'est pourquoi, le maraîchage joue un rôle très important sur le plan agronomique

de par l'assolement. Il contribue à assurer le maintien de la fertilité des sols.

Par ailleurs, les types de fumures organiques apportés sont différents selon les systèmes.

Dans le système périurbain (SP), on trouve un mélange hétérogène de déjections animales, d'ordures ménagères (cendres et balayures) et de résidus de récolte. Ce mélange, après quelques jours passés dans les fosses fumières, est acheminé sur les parcelles. En système urbain (SU1), les exploitants utilisent des ordures ménagères, des vidanges de fosses sceptiques et des sciures de bois des menuiseries. En système urbain (SU2), c'est surtout l'apport d'ordures ménagères.

Le tableau II donne respectivement les quantités moyennes, par hectare et par an, des apports organiques, minéraux et celles des exportations de biomasse en fonction des systèmes de culture.

Cependant, malgré ces quantités de fumures organiques élevées dans certains cas, beaucoup d'autres parcelles n'en reçoivent pas (Figure 1).

Les apports de fumures minérales sont le processus majeur de fertilisation des cultures. Les types de fumure minérale sont le NPK et l'urée.

## 3.3. Effets des systèmes de culture sur la teneur en carbone organique du sol

### 3.3.1. Variation de la teneur en carbone organique des sols

La figure 2 montre les teneurs initiales en carbone organique des sols et celles à la fin de l'étude. En comparant les résultats d'analyse des sols du début à ceux de la fin de l'étude, on constate que la teneur en carbone organique baisse sur 33 % des parcelles.

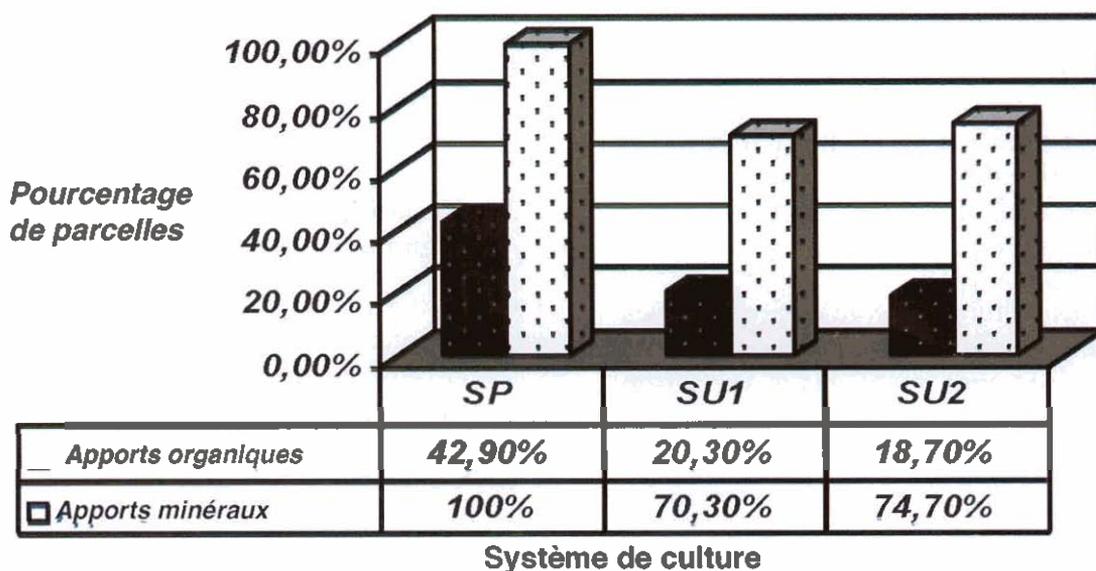
**Tableau I.** Successions culturales et mode d'occupation des terres dans la ceinture maraîchère

Site	Saison sèche							Saison des pluies						
	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.		
Système périurbain	Pomme de terre			Patate				Chou		Pâturage			Riziculture	
	Laitue			Haricot vert			Carotte		Chou		Céleri/Persil			
Système urbain 1	Laitue			Carotte ou Oignon			Betterave ou Chou		Riz ou Maïs					
Système urbain 2	Laitue			Carotte ou Oignon			Betterave ou Chou		Riz ou Maïs					

**Tableau II.** Quantités moyennes de fumures apportées et de biomasses exportées par système

Systèmes de culture	Quantités moyennes de fumure organique (t/ha/an)	Quantités moyennes de NPK+Urée (t/ha/an)	Quantités totales moyennes de matières sèches exportées (t/ha/an)
SP	7,37a	0,85a	13,57a
SU1	161,15b	0,96a	16,47a
SU2	8,81c	0,97a	10,22a
Probabilité	0,000	0,085	0,092
Signification	HS	NS	NS

Les moyennes affectées d'une même lettre dans une colonne sont statistiquement équivalentes selon le test de Newman-Keuls au seuil de 1 % ; HS : hautement significatif, NS : non significatif au seuil 5 %.



**Figure 1.** Répartition des systèmes de culture en fonction des apports en fertilisants (SP = système périurbain, SU1 = système urbain 1, SU2 = système urbain 2)

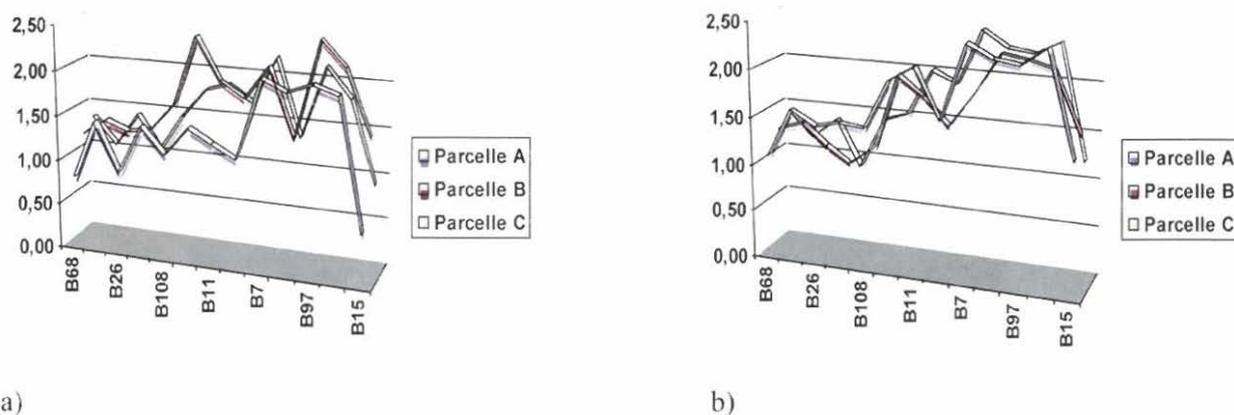


Figure 2. Variation parcellaire du carbone organique en fonction des exploitations agricoles (a : début, b : fin de l'étude. B7, B8, B11, B15, B26, B48, B50, B55, B68, B74, B97, B99, B108 sont les blocs représentés par les numéros des paysans)

### 3.3.2. Effets des labours

L'analyse de la figure 2 montre une faible relation entre la teneur en argile et la variation du bilan organique (en % C. org) du sol. Le coefficient de détermination  $R^2$  étant de 0,038, il ressort que seulement 3 % des variations du bilan organique sont liés à la nature du sol. Cet état de fait pourrait s'expliquer par les effets dus aux techniques culturales. En appliquant l'indice de stabilité de Pieri, on voit que hormis les sols du système (SU1) (indice  $St=9,27$ ) les sols des autres systèmes (SU2 et SP) sont déstructurés.

### 3.3.3. Effets des apports de fertilisants

Le suivi a révélé que, 38 % de l'ensemble des parcelles élémentaires, ont reçu uniquement des engrais minéraux, 51 % ont reçu de la fumure organo-minérales, 7 % de la fumure organique et 2 %, aucun apport.

L'analyse des données (tableau III) montre qu'il n'existe aucune relation significative, d'une part, entre les variations du taux de carbone organique du sol et les apports de fumures organiques ( $r = 0,370$ ,  $p = 0,119$ ) et, d'autre part, entre les variations du taux de carbone et les apports d'engrais minéraux ( $r = -0,278$ ,  $p = 0,315$ ) en fonction des systèmes.

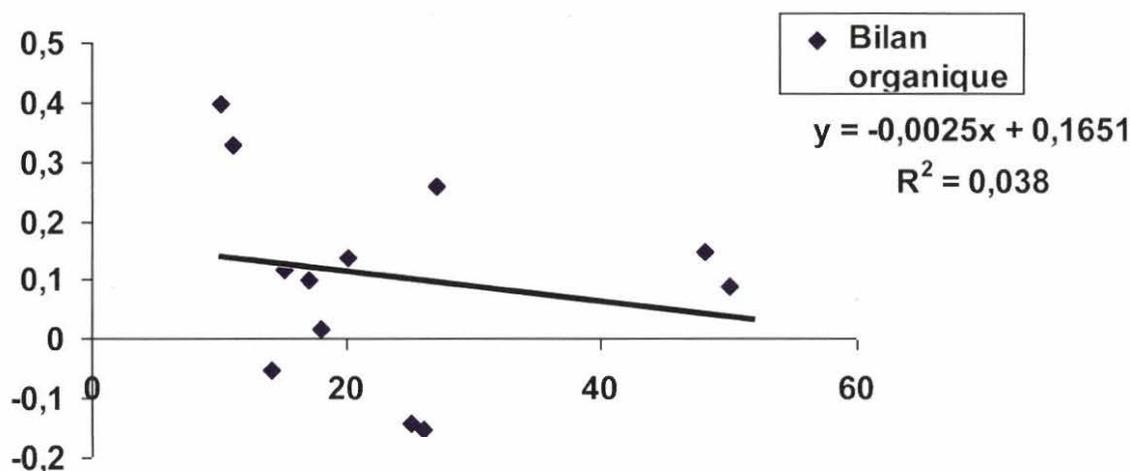


Figure 3. Relation entre le taux d'argile et le bilan organique (% C. org)

**Tableau III.** Relation entre le bilan organique parcellaire et les apports de fumures

Variabiles	n	R	Valeur de p	>0,05
Variations % C. org/Apports de fumures organiques combinées	19	0,370	0,119	NS
Variations % C. org/Apports engrais minéraux	15	-0,278	0,315	NS

### 3.3.4. Effets des exportations de biomasse

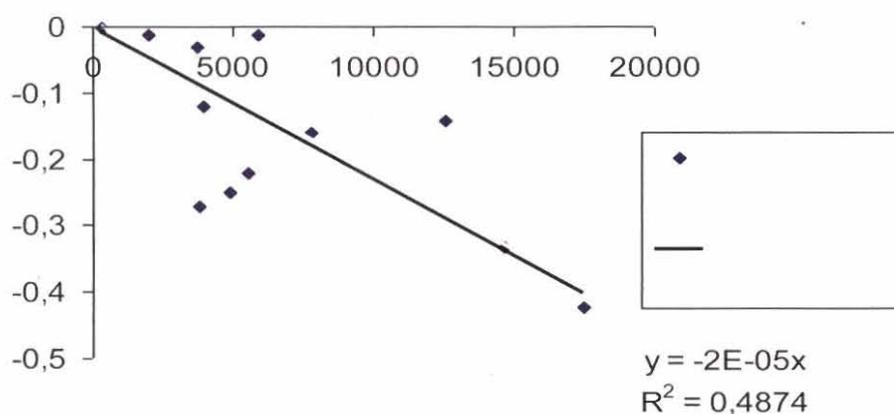
Les cultures en place influencent considérablement l'accumulation ou l'appauvrissement du stock de carbone dans le sol (à travers l'apport ou l'exportation des racines, feuilles et tiges).

La figure 4 montre une relation linéaire entre les quantités de biomasse exportées et la baisse des teneurs du carbone organique. Le test de corrélation de Pearson entre les baisses de la teneur en % C organique et les exportations de biomasse est significatif au seuil de 5 % ( $r=0,028$ ,  $n=13$ ). Cependant, au regard du coefficient de détermination  $R^2$  (48,74%), on constate que la baisse des teneurs en carbone est partiellement expliquée par les exportations de biomasse. Ce qui veut dire, que les exportations de biomasse seules ne suffisent pas à expliquer les pertes de carbone organique observées dans les différents systèmes étudiés.

## IV. Discussion

D'une manière générale, la formation des agrégats de sol est le processus limitant l'accès de la MOS aux micro-organismes minéralisateurs. Cette formation des agrégats est d'autant plus marquée que le sol renferme au moins 20% d'argile (Christen, 2008). Plusieurs recherches menées en milieux tropicaux et tempérés ont montré que la minéralisation du carbone des fractions, *in situ*, est généralement plus élevée dans les fractions sableuses que dans les fractions limoneuses ou argileuses. Dans notre cas les pertes de carbone les plus élevées ont été observées dans les systèmes SU2 et SP où les teneurs étaient élevées en argile et en limon.

Selon Six *et al.* (2002), le travail du sol constitue un facteur contribuant à la perte de la MOS par rupture des agrégats de sol formés. Nos résultats s'expliqueraient par une faible stabilité structurale des horizons de surface due aux labours. Les travaux de Ndandou (1998) ont donné les résultats similaires. Par



**Figure 4.** Relation entre le bilan organique (% C. org) et les exportations de biomasse

ailleurs, Bordeleau *et al.* (1992) trouvent que les cultures sarclées, comme la pomme de terre, diminuent le taux d'humus dans le sol. Donc les labours associés aux cultures maraîchères ont favorisé cette situation de perte en C organique des sols.

L'amélioration de la stabilité, selon Khaleel *et al.* (1981) et Bottinelli (2010), est liée à la quantité de fumure organique apportée au sol. Les résultats de l'étude ont révélé un bilan négatif en carbone organique sur 25 % des parcelles recevant de la fumure organo-minérale. Ces baisses de teneur en carbone variant de 0,05 à 0,67% sont semblables à celles observées par Traoré *et al.* (2004) sous cultures sèches (0,2 à 0,44%). Sûrement, les quantités de fumures organiques appliquées sur nos parcelles n'étaient pas suffisantes pour augmenter la teneur en carbone organique du sol. Les résultats de Bacyé (1993) ; Diallo *et al.* (2004) abondent dans le même sens et confirment que les systèmes de culture continue, à faibles restitutions organiques, entraînent une baisse du niveau organique.

Il faut remarquer qu'un grand nombre de parcelles ne reçoit que des engrais minéraux, principalement des engrais azotés. Or, de nombreux auteurs ont rapporté que la dégradation de la matière organique par les micro-organismes responsables de la minéralisation est fortement influencée par la disponibilité en azote.

L'emploi des engrais azotés augmente la baisse du taux de matière organique par une augmentation de la minéralisation (Sedogo, 1993). Cette perte de matière organique va de pair avec la perte en C organique du sol.

Cependant, il a été également noté quelques cas d'augmentation de la teneur du C organique sur certaines parcelles n'ayant reçu que des engrais minéraux. Selon Piraux *et al.* (1997), dans les conditions d'apports importants d'engrais minéraux, des cas d'augmentation résultent, en grande partie, de la production de biomasse racinaire des céréales. Dans notre situation, où les parcelles subissent des périodes d'inondation, les cas d'augmentation pouvaient aussi être dus à la submersion qui bloque la minéralisation du C, d'où accumulation de la MOS.

Dans le cas des cultures maraîchères, les résidus de récoltes sont intégralement exportés des parcelles. Or, selon Sedogo (1993) les exportations de résidus entraînent un appauvrissement de la matière organique du sol. Ce qui pourrait expliquer la relation linéaire observée entre les exportations de biomasse et la baisse des teneurs en carbone organique du sol.

## V. Conclusion

La fraction argileuse du sol est celle susceptible de garantir une protection relative de la MOS contre la biodégradation. En se référant au taux normal de perte de carbone organique compatible avec le taux d'argile de nos sols, on pouvait penser que ces sols ont un potentiel de stockage élevé de carbone. Mais nos résultats révèlent une faible relation entre les variations des taux de carbone organique et la teneur en argile des sols.

Par ailleurs, au regard du volume et du rythme des exportations de biomasse, l'irrégularité et la qualité des fumures organiques apportées ne permettent pas de compenser les pertes en carbone organique du sol.

De plus, les sols étant initialement peu pourvus en MO (moins de 3 %), les apports importants et réguliers d'engrais minéraux contribuent à accélérer la minéralisation de la MOS. La vitesse de renouvellement de la MOS étant faible pour les fractions limoneuses et argileuses, les stocks organiques de ces sols risquent de s'épuiser à moyen ou long terme.

## VI. Reconnaissance et Remerciements

Cette étude a été financée par la Fondation Volkswagen à Hanovre, en Allemagne dans le cadre du projet «Urban Food». Que la Fondation trouve ici la profonde gratitude des auteurs. Ce projet a été exécuté au Mali par l'Institut d'Economie Rurale en partenariat avec l'Université de Kassel en Allemagne.

Nos remerciements vont aussi au Professeur Dr. Andréas BUERKERT de « Organic Plant Production and Agroecosystems Research in the Tropics and Subtropics, University of Kassel » et au Professeur Dr. Eva SCHLECHT de « Animal Husbandry in the Tropics and Subtropics, University of Kassel and Georg-August-Universität Göttingen », pour la conception du projet et l'appui méthodologique constant lors de la collecte des données.

## VII. Références

- Ahmadi N., 1993. Esquisse d'une approche intégrée. Problématique et acquis de recherche. La mise en valeur des bas-fonds au sud Mali. 10p
- Albergel J., Lamachere J.M., Gadelle F., Lidon B., Ran A.M., Driel V.V., 1993. Mise en valeur agricole des bas-fonds au sahel. *Bulletin de liaison du CIEH n°91 Janvier*. pp2-8.
- Bagyè B., 1993. Influence des systèmes de culture sur l'évolution du statut organique et minéral des sols ferrugineux et hydromorphes de la zone soudano-sahélienne (Province du Yatenga, Burkina Faso). *Thèse de doctorat, Université de droit, d'économie et des sciences d'Aix-Marseille, 02 Juillet*. 258p.
- Bordeleau L.M., Herbert M., Lafond S., Lord J-M., Potvin D., Roy M. et Theriault J., 1992. Gestion de la matière organique de la ferme. *Bulletin d'information, Québec 2<sup>e</sup> trimestre*. 36p.
- Bottinelli N., 2010. Evolution de la structure et de la perméabilité d'un sol en contexte de non labour associé à l'apport d'effluent d'élevage : rôle de l'activité lombricienne. *Thèse de Doctorat, Université Européenne de Bretagne, Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agro-alimentaires, Horticoles et du Paysage, Février*. 164p.
- Christen M., 2008. Fertilisation raisonnée : priorité aux amendements organiques. *Brèves Décembre, n°28*. 6p.
- Diallo D., Barthes B., Orange D. et Roose E., 2004. Comparaison entre stabilité des agrégats ou des mottes et risques de ruissellement et d'érosion en nappe mesures sur parcelles en zone soudanienne du Mali. *Sécheresse n°1, vol.15 mars*. 5 : 57-64.
- Dugain F., Arial G., Audry P. et Jouga J., 1996. Les méthodes d'analyses utilisées au laboratoire de physico-chimie des sols. *Centre de Pédologie de Hann-Dakar, Avril*. 75p.
- Keïta M.K. et Van Der Pol F., 1988. Méthodes d'analyses des sols, plantes et eaux. Laboratoire Sol-eau-plante de Sotuba, IER. 56p.
- Khaleel R., Reddy K.R. and Overcash M.R., 1981. Changes in soil physical properties due to organic waste applications: a review. *J. Environ. Qual.* 10:133-141
- Koné A.W., Tondoh J.E., Reversat F.B., Merciris G.L., Brunet D. et Tano Y., 2008. Changes in soil biological quality under legume and maize based farming systems in a humid savanna zone of Côte d'Ivoire. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, volume 12, numéro 2: 147-155.
- <http://popups.ulg.ac.be/Base/document.php?id=2333>
- NDandou J.F.N., 1998. Variation du stock organique et des propriétés physiques d'un vertisol sous prairie après la mise en culture maraîchère. Effet du mode de travail du sol. *Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Sept*. 142p.
- Piroux M., Buldgen A., Steyaert P., Dieng A., 1997. Intensification agricole en région sahélo-soudanienne. *In Itinéraires techniques dans un contexte à risques. Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 1(3), 196-208.
- Sedogo P.M., 1993. Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture: incidence des modes de gestion sur la fertilité. *Thèse de doctorat, Faculté des sciences et techniques, Université Nationale de la Côte d'Ivoire, Février*. 353p.
- Six J., Conant R.T., Paul E.A. et Paustian K., 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and soil* 241: 155-176.
- Traoré K.B., Mc Carthy G., Gigou J., Doumbia M.D., Bagayoko A., Yost R.S., Konaré H., Dioni L., Coulibaly H., Sidibé A., Kablan R.A., 2004. Aménagement en courbes de niveau et conservation du carbone. *In: Roose Eric, De Noni Georges, Prat Christian, Ganry Francis, Bourgeon Gérard. Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone. Séquestration du carbone et érosion des sols. Paris: IRD, p. 568-569. Colloque international sur l'influence de la gestion de la biomasse sur l'érosion et la séquestration du carbone, 23 au 28 Août 2009, Montpellier, France.*
- Van Reeuwijk L.P., 2002. Procedures for soil analysis. Technical paper 9, Sixth edition. 101p.

# **Une expérience participative d'usage de la modélisation avec les paysans pour analyser la dynamique de la biodiversité des mils et sorghos dans les systèmes semenciers au Mali**

## **Le cas de l'atelier final du projet IMAS (ANR 2008-2012) : 16-19/01/2012**

### **Using participatory modeling with farmers in Mali to analyze agrobiodiversity dynamics in millet and sorghum seed systems**

#### **The case of the final project workshop IMAS (ANR 2008-2012): 16-19/01/2012**

**Bazile D.<sup>1</sup>, Sidibé A.<sup>2</sup> et Coulibaly H.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Coordinateur du Projet IMAS, CIRAD, UPR GREEN, TA C-47/F, Campus International de Baillarguet, F-34398 Montpellier, France & PUCV, Instituto de Geografía, Chili, Avenida Brasil 2241, Valparaíso, Chili. Tél +56.32.227.40.86 / Fax +56.32.227.40.90, didier.bazile@cirad.fr

<sup>2</sup>Coordinateur National au Mali du Projet IMAS. Chef de l'Unité des Ressources Génétiques, Institut d'Economie Rurale, Bamako, Mali. amadousidibe57@yahoo.fr

<sup>3</sup>Chercheur au Laboratoire Sol-Eau-Plante, Institut d'Economie Rurale, Bamako, Mali. hscoulibaly@yahoo.fr

### **Résumé**

Les systèmes de cultures des paysans intègrent la diversité d'espèces et de variétés en liaison avec la variabilité des milieux exploités. Le projet IMAS (Impact des Modalités d'Accès aux Semences sur la diversité des ressources génétiques en agriculture) porte sur la définition et la mise en œuvre de modes de gestion adaptés à la conservation dynamique *in situ* des ressources génétiques face aux changements globaux. Il vise à identifier de nouvelles formes de gestion de la diversité variétale des mils et sorghos basée sur l'interaction à différentes échelles des systèmes semenciers paysans, marchands et institutionnels. La méthodologie s'appuie sur la co-construction d'outils innovants, les modèles multi-agents, capables d'intégrer les points de vue des différents acteurs puis de simuler les aspects dynamiques de la gestion de la biodiversité pour analyser les impacts des évolutions futures.

Un modèle conceptuel de gestion des variétés de mils et de sorghos a été élaboré et un modèle de simulation de scénarii d'impact d'introduction de nouvelles variétés a été validé à travers des jeux de rôle.

**Mots clés :** Agrobiodiversité, Système semencier, Modélisation, Gestion

### **Abstract**

Farming systems integrate this diversity of species and varieties in connection with the variability of the lands farmed. In response to global change, the IMAS project focuses on the definition and implementation of management practices adapted to the dynamic *in situ* conservation of genetic resources. It aims to identify new forms of managing varietal diversity based on interaction at different levels of farmer, commercial, and institutional seed systems. The proposed methodology is based on the joined construction of innovative tools - multi-agent models - able to integrate

the points of view of different stakeholders and then to simulate the dynamic aspects of biodiversity management in order to analyze the impact of future developments.

An abstract model of management of pearl millet and sorghum varieties was elaborated and a model simulation of scenario impact of introduction of new varieties was validated through role-playing games.

**Key words:** Agrobiodiversity, Seed System, Modelling, Management

## I. Introduction

Contrastant avec le constat généralement admis d'une biodiversité érodée par l'activité humaine, les pratiques de sélection des ressources phytogénétiques par les agriculteurs, depuis les débuts de l'agriculture et les domestications qui se poursuivent encore aujourd'hui, ont généré une diversité intra-spécifique riche et originale. Contrairement à la plus grande partie de la biodiversité naturelle, l'agrobiodiversité relève d'une gestion humaine, active et continue (Chevassus-au-Louis & Bazile, 2008). Les «centres de diversité» des plantes cultivées restent largement situés dans les pays en développement où l'agriculture traditionnelle gère une grande diversité d'espèces et de variétés en liaison notamment avec la diversité et la variabilité des milieux exploités (Soumaré *et al.*, 2008). Des progrès ont été accomplis pour caractériser la gestion paysanne de la diversité, mais la définition et la mise en œuvre de modes de gestion adaptés à la préservation dynamique *in situ* des ressources génétiques face aux changements globaux restent peu étudiées. Des approches innovantes doivent donc être proposées, dans le but d'intégrer savoirs scientifiques et locaux (Bazile, 2006).

Les équipes CIRAD, IRD et IER ont déjà pu démontrer leur capacité à produire des connaissances nouvelles sur l'agrobiodiversité dans les projets passés et en cours en

collaboration avec d'autres collègues d'autres Instituts Nationaux de Recherche Agronomique. Deux projets sont fondateurs de la dynamique de recherche en cours : «*Evolution de la diversité des mils et des sorghos cultivés au Niger entre 1976 et 2003 : influence des facteurs naturels et anthropiques*» (Institut Français de la Biodiversité, IFB actuelle FRB) et, «*Agrobiodiversité du sorgho au Mali et au Burkina Faso*» (Fonds Français pour l'Environnement Mondial, FFEM) auxquels il faut ajouter le projet IER IPGRI FAO FIDA «*Développement participatif de stratégies de conservation in situ en zones pré-désertiques et désertiques des mil, sorgho, niébé*» de 1999 à 2002 regroupant le Mali et le Zimbabwe qui a été le premier projet de gestion participative de l'agrobiodiversité. Ils ont posé les bases d'une recherche pluridisciplinaire et multi acteurs pour améliorer notre réflexion sur la complexité de la structuration génétique et la complémentarité des systèmes de conservation. La participation à d'autres projets intègre ce positionnement : «*Modélisation multi-agents des réseaux d'échange de semences pour améliorer la conservation in situ des variétés locales de céréales en Afrique de l'Ouest*» (Bureau des Ressources Génétiques, actuellement inséré dans la FRB), «*Vers une autonomie des agriculteurs sahéliens dans la gestion et l'exploitation de la diversité agricole, pour l'amélioration de leurs stratégies de subsistance*» (Fonds International pour le Développement Agricole, FIDA). Le projet IMAS (Impact des Modalités d'Accès aux Semences sur la diversité des ressources génétiques en agriculture) a bénéficié dès son démarrage des apports des résultats de ces autres projets mais aussi d'une large expérience accumulée sur les méthodes utilisées.

L'objectif général du projet IMAS est de contribuer à la valorisation et au maintien de l'agrobiodiversité dans les pays du Sud. Aussi IMAS cherche à promouvoir l'interaction d'une part entre scientifiques de disciplines différentes et, d'autre part entre tout acteur participant aux dynamiques semencières.

## II. Objectifs

Dans le but de trouver une réponse satisfaisante à la question : «Comment maintenir une diversité variétale élevée dans les régions où le développement actuel de l'agriculture peut fortement réduire la biodiversité ?», le projet IMAS souhaite s'appuyer sur l'étude de cas de la conservation *in situ* de la diversité de céréales traditionnelles (mil et sorgho) au Mali. À l'heure actuelle, cette conservation repose en grande partie sur le maintien des variétés via le système semencier paysan.

Le projet IMAS répond aux Stratégies Nationales de Recherche sur la Biodiversité qui visent à améliorer la concertation de réseaux d'opérateurs impliqués dans la conservation pour développer ensemble des stratégies durables. En outre, le mode de modélisation retenu favorise l'aspect pluridisciplinaire des recherches pour appréhender les changements en cours dans le rapport des sociétés à la biodiversité et simuler de nouvelles formes de gestion de la

biodiversité agricole. IMAS s'appuie sur les concepts du développement durable avec une prise en compte des dimensions écologiques, économiques et sociales des changements de biodiversité. Le projet est soucieux d'intégrer ces connaissances pluridisciplinaires dans des modèles pour explorer par simulation de nouvelles pratiques d'utilisation durable des espèces et des variétés.

IMAS est un projet de recherche finalisée, centré sur la biodiversité et la gestion des ressources en agriculture, visant à la mise au point d'outils pour l'aide à la décision ou, tout au moins d'aide à la réflexion. En outre, il aide à redéfinir les stratégies de conservation de l'agrobiodiversité en considérant des points de vue multi acteurs.

L'objectif du présent article est de présenter la méthodologie et les résultats des travaux de l'atelier final du projet IMAS au Mali qui s'est tenu à l'IER de Bamako (CRRA de Sotuba) du 16 au 19 janvier 2012.



Photo 1. Participants à l'atelier final IMAS 2012 (@Didier Bazile, Cirad)

### III. Matériel et méthodes

La participation des différents groupes d'acteurs en présence a été facilitée par l'usage d'un jeu de rôle spécialement conçu pour cet atelier à partir du modèle conceptuel élaboré entre tous les chercheurs du projet et validé en mars 2011 au Mali avec des représentants paysans de plusieurs régions.

Après une description générale de la méthodologie du projet IMAS, nous présenterons en détail les éléments de matériel et de méthodes spécifiques à l'atelier considéré.

Dans les régions climatiques défavorables, en particulier sous les tropiques semi-arides, le maintien d'une diversité génétique élevée a permis la survie et l'adaptation des populations humaines au cours des siècles (Mazoyer et Roudart, 2002). Les agriculteurs s'appuient encore sur la diversité variétale maintenue par les pratiques de gestion de semences (Brookfield *et al.*, 2002). Cette diversité est un réservoir d'adaptabilité génétique pour faire face aux changements économiques et environnementaux. Le système semencier paysan apparaît essentiel en complément du système semencier national : i- pour la préservation des variétés locales, ii- comme canal de diffusion des variétés améliorées, iii- pour la gestion raisonnée en réponse aux crises (Almekinders et Louwaars, 2002; McGuire, 2005; Sperling et Cooper, 2003). Ainsi, l'accès et la circulation des semences peuvent être étudiés au plan théorique comme un transfert d'innovation et, au plan pratique, dans le cas présent d'IMAS, nous nous intéressons à l'impact de cette diffusion.

En 1996, un groupe de chercheurs proposait une démarche appelée modélisation d'accompagnement pour aborder la gestion des ressources renouvelables et de l'environnement (Bousquet *et al.*, 1996). Il s'agissait de s'engager dans une démarche transdisciplinaire pour aborder l'objet d'étude, et de s'appuyer sur la méthode de la modélisation pour catalyser le processus d'interaction entre chercheurs de différentes disciplines. Plusieurs expériences proposèrent des modèles intégrant différents

types de connaissances disciplinaires avec comme objectif de faire interagir les différents porteurs de savoirs, qu'ils soient chercheurs ou acteurs locaux, au moyen de différents outils comme les jeux de rôles, les enquêtes et interviews et, les modèles de simulation. La modélisation d'accompagnement repose sur ces nouvelles méthodes et outils pour aborder les systèmes complexes en situation d'incertitude que ce soit pour des objectifs de recherche ou d'appui à la décision collective (Le Page *et al.*, 2004).

Dans le cas présent du projet IMAS (*imas.agropolis.fr*), financé par l'Agence Nationale de la Recherche" (ANR-France:2008-2012), le projet a été élaboré par une équipe multidisciplinaire (agronomes, géographes, économistes, généticiens, sociologues, etc.) composée de chercheurs et d'enseignants-chercheurs de France, du Chili, du Mali et du Burkina-Faso.

Les équipes IER (Institut d'Economie Rurale, Mali), CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, France), INRA (Institut National de la Recherche Agronomique, France), IRD (Institut de Recherche pour le Développement, France) et, ICRISAT (*International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics*) du projet travaillent ensemble depuis de nombreuses années en Afrique de l'Ouest sur la diversité des mils et sorghos (Bazile & Weltzien, 2008). La culture des mils et des sorghos, au Mali, se caractérise par un approvisionnement en semences à 90% à partir du système semencier paysan, une forte résilience du système mais une accélération des entrées extérieures (Organisations paysannes, Vulgarisation agricole, Recherche, Divers projets) et une absence de reconnaissance par le marché de la diversité cultivée (Coulibaly *et al.*, 2008). La situation en Afrique de l'Ouest des mils et des sorghos correspond encore à ce jour, au plan théorique, à un modèle d'agriculture traditionnelle centrée sur l'autoconsommation avec le maintien *in situ* de la diversité variétale par les communautés locales avec un faible recours à l'Etat.

Les activités du projet IMAS ont été les suivantes durant les quatre dernières années :

1. Caractérisation du rôle des pratiques agricoles dans la structuration de la diversité génétique des variétés locales et améliorées aux différentes échelles : exploitation, village, région et pays ;
2. Analyse de l'agrobiodiversité comme facteur de stabilité des productions agricoles y compris par l'insertion des exploitations agricoles dans les marchés et les réseaux ;
3. Compréhension des mécanismes et des stratégies paysannes de prise de décision dans les diverses régions agricoles au regard des normes et incitations pour les acteurs aux différentes échelles ;
4. Analyse des modes de création et diffusion des semences de nouvelles variétés aux différentes échelles avec l'étude des contraintes liées aux droits de propriétés intellectuelles ;
5. Modélisation des systèmes semenciers et partage de cette représentation avec les différents acteurs et disciplines du projet ;
6. Utilisation des modèles multi-agents et jeux de rôles pour tester des scénarios d'évolution de la diversité variétale.

Les méthodes utilisées reposent sur : a) l'analyse de la diversité génétique des plantes, b) l'économie institutionnelle et de l'économie des filières, c) la socio anthropologie, d) l'agronomie système et la géographie et, e) la modélisation des systèmes complexes associée aux démarches participatives et la recherche-action.

La méthodologie s'appuie sur un processus itératif selon des boucles alternant des phases de recueil de données terrain / de conceptualisation et de modélisation des systèmes / de confrontation aux acteurs lors d'ateliers communs / de validation ou de réfutation. Un retour permanent vers les acteurs (paysans et chercheurs) permet de

confronter la compréhension du système par le chercheur ou les parties prenantes et de travailler sur l'acceptation des représentations mobilisées.

La conceptualisation et le développement participatif des modèles de systèmes semenciers reposent sur une coordination scientifique par l'aval basée sur l'animation d'ateliers où sont associés tous les chercheurs et des représentants des paysans de différents contextes géographiques. Les travaux de terrain sont structurés aux trois échelles du système avec l'étude de la diversité génétique (de la plante à la parcelle), l'étude de la diversité des systèmes agraires (de la parcelle à la petite région agricole) et l'étude des régulations sociales, économiques et politiques (du marché local au pays).

Du 16 au 19 janvier 2012 s'est tenu à Bamako (Mali), l'atelier final du projet. Durant 4 jours, 30 participants regroupant des paysans des zones de Tominian, Koutiala, Sikasso et Dioila, des chercheurs de différentes institutions maliennes (IER), française (Cirad) et internationale (ICRISAT), des représentants du conseil et de la vulgarisation agricole, des représentants d'ONG et des responsables d'autres projets de recherche-développement travaillant au Mali sur cette thématique de la gestion de la biodiversité agricole au Mali (PASE2/AFD, FFEM) se sont retrouvés pour échanger sur la question de l'agrobiodiversité et de sa gestion.

La première journée a permis de présenter et discuter les résultats scientifiques majeurs du projet qui analysent l'évolution de la diversité des mils et sorghos aux différentes échelles de la plante et du gène, des exploitations agricoles et des systèmes agraires, puis à des échelles régionales et nationale selon les régulations socio-économiques portées par les politiques publiques et les marchés.

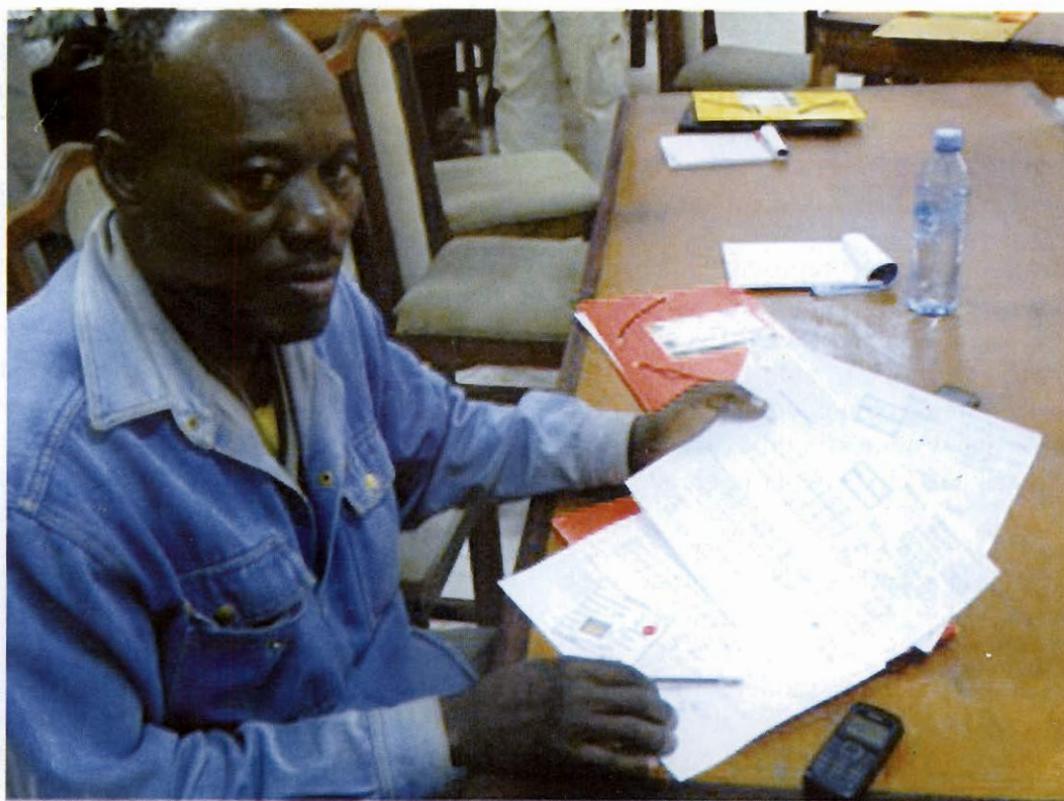
Les jours suivants, les paysans ont pu partager le modèle conceptuel du modèle informatique (Belem *et al.*, 2011) développé au travers d'un jeu de rôle où ils devaient reproduire le comportement des différents types de paysans

d'un village malien virtuel devant semer et produire à partir d'une diversité de variétés de sorghos à leur disposition ou de l'introduction d'une variété améliorée par une organisation paysanne.

Nous avons construit pour ce jeu de rôle un village abstrait afin de faciliter la participation à l'identique de tous les paysans originaires de régions très différentes du Mali. Ce village correspond :

- à une zone agroclimatique du Mali central avec une pluviométrie moyenne sur les 10 dernières années de 900 mm réparties sur 6 mois de mai à octobre ;
- une irrégularité des pluies à l'installation de la saison et fin de saison moins variable ;
- une diversité des paysans selon la surface cultivée (petite/grande), le niveau de mécanisation des exploitations (1 : peu équipées, 2 : moyennement équipées, 3 : bien équipées), l'utilisation de deux types de sols à richesse minérale et réserve hydrique différentes (sableux ou argileux).

Dans le jeu, chaque joueur représente un paysan qui prend ses décisions pour semer en choisissant du coton, du maïs et différentes variétés de sorgho. Pour cela, il doit disposer de semences autoproduites l'année précédente ou se procurer la semence de la variété désirée auprès d'autres paysans ou fournisseurs. Chaque paysan dispose d'une carte qui spécifie les caractéristiques structurelles de son exploitation : la surface cultivable, le nombre de personnes (pour déterminer le niveau l'autoconsommation et la main-d'œuvre active), le niveau d'équipement qui limite la surface cultivée, l'argent à l'initialisation du jeu (trésorerie), la stratégie de changement de variété (innovateur, imitateur ou conservateur) et les revenus générés par d'autres activités non agricoles (élevage, arboriculture, maraîchage ou travail salarié extérieur, etc.) et, enfin, son appartenance à une organisation paysanne (OP) ou pas. Comme, dans la réalité, la majorité des paysans d'un même village appartiennent à l'OP locale et sont moyennement équipés, ce qui permet d'avoir une surface cultivable moyenne.



**Photo 2.** Un paysan remplissant sa fiche d'assolement (@Didier Bazile, Cirad)

Deux sessions du jeu de rôle ont été organisées sur la même journée. Chaque session (matin et après-midi) comprenait trois pas de temps annuels et correspondait à un scénario en particulier : le matin, les représentations des entités modélisées dans le système ont été partagées pour valider la structure et la dynamique du modèle à travers le jeu de rôle. Le paysan devait pour cela comprendre notre représentation [simplifiée] de son système à partir des règles de décision relatives à la production agricole (assolement limité à 3 espèces), le choix des variétés en fonction des pluies et des types de sol, l'introduction et l'abandon de variétés, la gestion des stocks de semences et de grains, etc. Dans le premier scénario, joué le matin, on considère seulement l'investissement en matériel agricole des UPA (Unité de Production Agricole dans le sens d'une exploitation agricole composée de différents ménages) via l'OP. L'objectif de ce scénario 1 est d'analyser comment une augmentation du niveau d'équipement, qui induit de facto [pour le jeu de rôle] une augmentation de la superficie cultivée, a un impact sur la dynamique variétale des sorghos. Si l'UPA dégagne assez de bénéfices en fin d'année, elle peut, via l'OP, accéder à de l'équipement et changer de niveau d'équipement dans la typologie initiale (passage pour une année donnée d'un niveau d'équipement au niveau directement supérieur : de 1 à 2, ou de 2 à 3).

Le scénario 2 joué l'après-midi correspond à l'introduction d'une nouvelle variété par l'OP. L'objectif de cette étape 2 est de discuter directement de l'effet de la diffusion d'une nouvelle variété par l'OP sur la diversité variétale du village.

Dans le cadre du déroulement proprement dit du jeu de rôle, l'année se découpe en trois temps liés aux pluies : début de saison des pluies, période de récolte, l'intersaison ou saison sèche. Au démarrage de la saison des pluies, selon leurs caractéristiques propres, les UPA doivent définir leur assolement pour

l'année N. La date de début de saison marque le démarrage des semis, les UPA cherchent à prédire le climat possible de l'année et se projettent pour estimer les rendements espérés des espèces/variétés cultivées. L'UPA ne sème qu'avec les variétés qui sont disponibles dans son exploitation, sinon elle doit chercher des fournisseurs. À la fin de la campagne agricole, il est procédé à la récolte. L'animateur annonce la fin de la saison des pluies et invite les paysans à aller récolter en portant leurs fiches d'assolement (avec les cartes de semences utilisées) aux postes de saisie pour le calcul automatique des productions (animateurs disposant d'ordinateurs portables). L'assistant reporte en direct sur la fiche d'assolement les données de production par parcelle pour l'année N et remet à l'UPA de nouvelles cartes de semences en cas de non échec de la culture. Le paysan détermine alors la part utilisée pour l'autoconsommation dans l'année entre le maïs et les variétés de sorgho. Ensuite, il peut constituer un stock de grains de sécurité ; le solde de la production étant ensuite considéré comme disponible pour la vente est vendu en totalité. La génération automatique du calcul des ventes au prix du marché nous donne l'estimation du revenu annuel cumulé pour la somme des cultures avec ajout du complément de revenus des autres activités. Enfin, la saison sèche est propice aux échanges de semences entre paysans et à l'achat de matériel. Pour chaque groupe d'espèce, les UPA évaluent les rendements de leurs variétés et décident du possible remplacement des moins performantes. La nouvelle variété est déterminée en fonction de la stratégie d'innovation. Les innovateurs cherchent une nouvelle variété auprès de l'OP et les imitateurs auprès d'autres UPA ayant déjà expérimenté cette variété. Les conservateurs ne changent jamais de variétés, ils conservent toujours la variété héritée de leurs parents. Les UPA peuvent échanger librement, entre elles, les semences dès lors que le donneur dispose bien de cette semence (carte spécifique de la semence de la variété autoproduite).

## IV. Résultats discussions

Le Jeu de Rôle (JdR) est un outil qui a permis, pendant l'atelier de Bamako (16-19/01/2012), de partager notre représentation (celle des chercheurs) du système semencier formalisée dans un modèle informatique. Cette mise en scène de la prise de décision, via le Jeu de Rôle, permet plus facilement de discuter le modèle sous-jacent car ce nouvel outil devient un objet intermédiaire, plus facile à réfuter. Il sert alors à poser de nouvelles questions pour modifier, adapter les représentations et travailler sur de nouveaux scénarios.

Sur la représentation de la structure du système et des dynamiques (fonctionnement, prise de décisions), les paysans ont validé le cadre général de modélisation retenue qui permet à tout joueur paysan de prendre ses décisions de la même façon que dans son exploitation. Un certain nombre de points liés au paramétrage du jeu ont alimenté les discussions et ont pu être débattus :

- Les rendements des différentes espèces et variétés cultivées (maïs, sorgho, coton) sont des données à dire d'expert (chercheurs IER et CIRAD). Ils représentent des moyennes pour les zones considérées dans une matrice de contextes pédo-climatiques spécifiques (sol sableux ou argileux – cumul précipitations bon, moyen ou mauvais – semis précoce, normal ou tardif). Les moyennes utilisées dans le jeu sont satisfaisantes pour un jeu dont l'objectif est la question du maintien des variétés de sorgho donc en particulier celle de la reproduction des semences de ces différentes variétés. Pour le maïs et le coton, les données moyennes conviennent et il n'est pas utile de les modifier. Par contre, dans le cas des variétés locales de sorgho, même s'il est convenu d'une très forte stabilité de celles-ci sous diverses conditions environnementales, il faudrait accentuer les différences de rendement des

abaques du jeu entre les deux types de sol (argileux et sableux) afin de mieux mettre en exergue les possibilités de choix entre variétés pour les paysans.

- La prise en compte des charges (intrants, carburant, fonctionnement et entretien matériel, etc.) pour définir la marge brute et nette de la production. Une présentation des méthodes de calcul des prix de vente utilisés pour le Jeu de Rôle a permis de clarifier les esprits. Dans le cas du coton, le prix payé au producteur (250 FCFA/kg) inclus déjà les dépenses effectuées pour les intrants et les semences mais il ne tient pas compte des salaires, ni de l'entretien du matériel en particulier pour les motorisés. Le prix payé au producteur pour le maïs (175 FCFA/kg) est un prix payé bord de champ moins le coût estimé des intrants. Dans le cas du sorgho, un prix unique de 200 FCFA/kg a été retenu quelle que soit la variété, cultivée sans intrant en conditions paysannes. La méthode considère un prix fixe alors que les variations saisonnières sont importantes sur les céréales. Une amélioration du JdR pourrait alors porter sur la stratégie de vente des producteurs pour maximiser le revenu du paysan.
- L'autoconsommation et les réserves de sécurité en grains ont été longuement débattues, d'une part, sur la quantité devant être considérée par personne et par an, et, d'autre part, sur les stocks mis en place par le paysan et gérés sur un pas de temps pluriannuel. Un consensus sur un niveau de consommation de 240 kg céréales/pers/an en milieu rural au Mali a été admis et validé, il correspond aux données utilisées par le CILSS (Comité permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel). La mise en place d'un stock de sécurité pour une année est considérée comme normale et celui-ci est alimenté en fonction des années selon le niveau de production agricole.

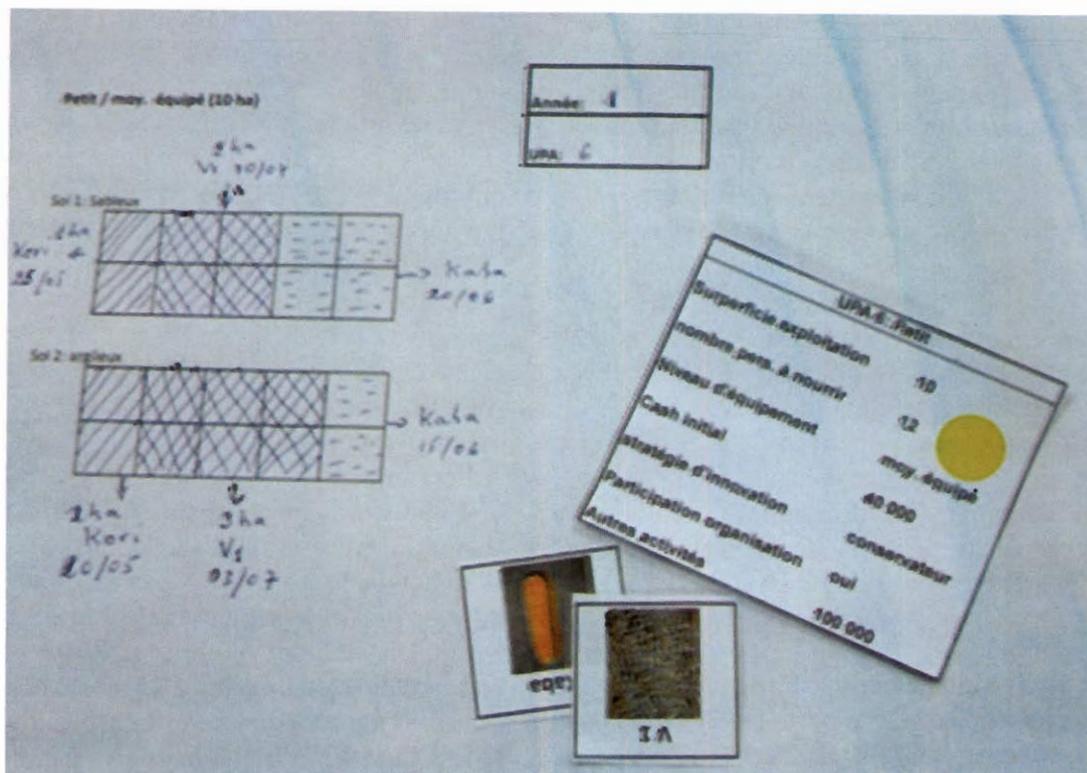


Photo 3. Exemple de fiche d'assolement complétée pour une UPA (@Didier Bazile, Cirad)

Le scénario 1 du JdR a permis d'analyser la dynamique de quatre variétés de sorgho avant que l'Organisation Paysanne n'introduise une nouvelle variété de la recherche dans le scénario 2. Sur les différents sorghos cultivés dans le JdR, le profil de distribution avec deux variétés majeures (V1, V2) et deux mineures (V3, V4) s'est maintenu sur les cinq années du jeu. Et ceci, malgré les échanges entre joueurs, on a pu noter qu'à l'échelle du village, un nombre constant de paysans ont continué à cultiver ces différentes variétés d'où un équilibre se crée à ce niveau, celui du village, malgré des modifications très fortes à l'échelle UPA d'une année sur l'autre.

Cette situation s'est maintenue à l'échelle du village malgré les échanges de variétés entre les joueurs avec un nombre constant de paysans. Ceci crée un équilibre entre les différentes variétés au niveau du village, malgré les modifications fortes à l'échelle.

En se basant sur des représentations théoriques de situations de dynamiques variétales, le village abstrait du JdR correspond au cas d'un village stable malgré toutes les contraintes fixées dans le jeu : modification de l'équipement, réseaux d'échanges de semences contraints, introduction d'une nouvelle variété par l'OP, etc. Il ressort que les variétés majeures (V1, V2) restent cultivées sur de grandes surfaces par beaucoup de paysans et que les variétés mineures (V3, V4) sont toujours cultivées par peu de paysans sur de petites surfaces durant les 5 années du jeu et malgré la diffusion et l'extension rapide de la variété V5 pendant les trois dernières années. Ce village correspond bien sûr à un cas particulier mais il prouve que certaines situations montrent une forte résilience aux perturbations pour le maintien d'une diversité variétale élevée.

Les règles de diffusion de la variété par l'OP ont été validées par les participants. Si la diffusion d'une variété se fait par une OP, la première année est toujours limitée

à quelques membres choisis de l'OP pour expérimenter la variété. Les paysans sont alors choisis par l'OP en fonction de critères liés à leurs bonnes pratiques agronomiques et semencières et, à leur ouverture pour des visites à d'autres paysans du village. En effet, l'expérimentation conduite par l'OP se fait dans un esprit de démonstration/diffusion de la variété. Si le résultat de l'expérimentation est positif alors tous les autres paysans adoptent la nouvelle variété. Ainsi, le fait de lier dans le Jeu de Rôle l'expérimentation et la diffusion aux comportements des paysans selon leur stratégie de production (stratégies paysannes de conservateur, imitateur ou innovateur) permet de bien rendre compte des dynamiques de diffusion réelles.

La discussion générale autour du JdR et des scénarios traités a permis au groupe de paysans présents de recentrer l'utilisation du modèle de simulation sur un scénario qu'ils jugent important pour la dynamique des variétés : Comment les changements d'assolement (Surfaces \* Cultures/Variétés) s'ajustent-ils aux fluctuations des prix ? À partir de là, les paysans proposent de réutiliser le modèle afin de tester sur quoi pourraient influencer ces changements (extension des surfaces, modification de l'équipement).

## V. Conclusions

L'atelier national IMAS a permis de partager le modèle multi-agents générique développé pour représenter les systèmes semenciers afin d'analyser l'impact de certains scénarios sur la dynamique des variétés de sorgho cultivées. L'utilisation du Jeu de Rôle avec les paysans n'a pas posé de problèmes pratiques. Les paysans ont très facilement pu se transposer dans le jeu de rôle pour prendre leurs décisions de semis comme dans leurs exploitations réelles. La discussion sur l'utilité de l'outil pour la prise de conscience, la concertation et la projection a montré les différentes possibilités d'application du modèle à des contextes sociopolitiques et géographiques divers.

Parmi les recommandations à l'issue de cet atelier, des propositions concrètes ont été faites pour améliorer la complémentarité entre les modes de conservation *in situ* et *ex situ* pour la gestion dynamique des ressources phytogénétiques (RPG) (Bazile *et al.*, 2011). Un accord a été trouvé entre la Recherche, les OP et les ONG sur l'intérêt mutuel de renforcer les collaborations entre l'URG/IER (actuelle banque nationale des RPG) et les banques de semences locales et les foires gérées par les OP. Une possibilité avancée par l'URG est de pouvoir régénérer les semences de ses collections *ex situ* dans les zones d'origine de ces semences, ce qui donnerait dans le même temps, l'opportunité à l'OP locale de récupérer d'anciennes variétés perdues et d'enrichir sa banque locale de semences. Enfin, il a été noté l'importance de développer et d'améliorer les bases de données sur les RPG gérées par l'URG afin de mieux diffuser cette information vers l'AOPP et les OP intéressées, par exemple sous forme de catalogues ou de bases de données numériques. Un moyen de développer ces liens et ces échanges entre acteurs serait d'associer les agriculteurs dans la création et le fonctionnement du futur comité national des RPG qui devra être le nœud du réseau national de conservation des RPG.

L'atelier national de fin de projet IMAS a démontré que le renforcement de la collaboration entre la recherche et les producteurs dans le cadre de l'exécution du projet est un bien acquis et qu'il doit désormais constituer un socle à maintenir pour le futur.

## VI. Remerciements

Le projet IMAS a bénéficié d'un financement français de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-07-BDIV-016-01). Les auteurs remercient tous les producteurs et représentants d'organisations paysannes des différentes régions du Mali qui ont pu laisser leurs activités et leurs familles durant ces quelques jours, pour assister et représenter leurs communautés locales et régionales lors de cet atelier national du projet IMAS. Un remerciement particulier à Harouna Coulibaly pour sa participation à l'organisation et à

l'animation de l'atelier, puis à François Bousquet avec qui le jeu de rôle a été préparé. Enfin, un remerciement chaleureux à tous les chercheurs IER, CIRAD, ICRISAT pour leur présence et leur participation à l'animation du jeu de rôle et, pour tous les échanges fructueux effectués durant ces journées.

## VII. Références bibliographiques

- Almekinders, C.J.M. and Louwaars, N.P., 2002. The importance of the farmer's seed systems in a functional national seed sector. *Journal of new Seeds*, 4(1-2): 15-33.
- Bazile D. 2006. State-farmer partnerships for seed diversity in Mali. Londres: IIED, 22 p. (Gatekeeper Series : IIED, 127). <http://www.iied.org/pubs/pdf/full/14519IIED.pdf>
- Bazile D., Coulibaly H., Martinez E.A. 2011. Droits des agriculteurs sur leurs semences: le long chemin entre la conservation *in et ex situ*. *Revue Grain de sel* N°52-53: 15-17. [http://www.inter-reseaux.org/IMG/pdf/GdS52-53\\_Semences.pdf](http://www.inter-reseaux.org/IMG/pdf/GdS52-53_Semences.pdf)
- Bazile D. (ed.), Weltzien E. (ed.). 2008. Agrobiodiversités : numéro spécial. *Cahiers agriculture*, 17(2). Paris: John Libbey Eurotext, p. 73-256.
- Belem M., Bousquet F., Müller J.P., Bazile D., Coulibaly H. 2011. A participatory modeling method for multi-points of view description of a system from scientist's perceptions: application in seed systems modeling in Mali and Chile. *In: 7th European Social Simulation Association Conference (ESSA 2011)*, Montpellier, France, September 19-23, 2011.
- Bousquet, F., Barreteau, O., Mullan, C. and Weber, J., 1996. Modélisation d'accompagnement: systèmes multi-agents et gestion des ressources renouvelables, "Quel environnement au XXIème siècle ? Environnement, maîtrise du long terme et démocratie", Abbaye de Fontevraud, France. ORSTOM, pp. 10.
- Brookfield, H., Padoch, C., Parsons, H. and Stocking, M. (Editors), 2002. *Cultivating biodiversity*. ITDG Publishing and United Nations University, London (UK), 292 pp.
- Chevassus-au-Louis B., Bazile D. 2008. Cultiver la diversité. *Cahiers Agricultures*, 17 (2) : 77-78.
- Coulibaly H., Bazile D., Sidibé A & Abrami G. 2008. Les systèmes d'approvisionnement en semences de mils et sorghos au Mali : production, diffusion et conservation des variétés en milieu paysan. *Cahiers Agricultures*, 17 (2): 199-202.
- Mazoyer, M. and Roudart, L., 2002. *Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine*. Points Histoire. Seuil, Paris (F), 705 pp.
- McGuire, S., 2005. *Getting Genes: Rethinking seed system analysis and reform for sorghum in Ethiopia*. PhD Thesis, Wageningen Universiteit, Wageningen (NL), 293 pp.
- Le Page, C., D'Aquino, P., Etienne, M. and Bousquet, F., 2004. Processus participatifs de conception et d'usage de simulations multi-agents. Application à la gestion des ressources renouvelables. *In: O. Boissier and Z. Guessoum (Editors), Systèmes multi-agents défis scientifiques et nouveaux usages. Actes des JFSMA 2004*. Hermès, Paris, pp. 33-46.
- Soumaré M., Bazile D., Vaksman M., Kouressy M., Diallo K., Diakité C.H. 2008. Diversité agroécosystémique et devenir des céréales traditionnelles au sud du Mali. *Cahiers Agricultures*, 17 (2) : 79-85.
- Sperling, L. and Cooper, H.D. (Editors), 2003. Understanding seed systems and strengthening seed security: a back ground paper. *Proceedings of a stakeholders' workshop, Rome, 26-28 May 2003: "Understanding seed systems and seed security. In: Improving the effectiveness and sustainability of seed relief"*. FAO, Rome (I), 35 pp.

# Variabilité climatique et son impact sur le régime hydrologique dans le delta central du Niger

## Climate variability effects on hydrologic regime in the central delta of the Niger river

Traoré S. S.<sup>1</sup>, Diakité C. H.<sup>1</sup>, Maïga M.<sup>2</sup>, Ballo A.<sup>3</sup>

Laboratoire Sol-Eau-Plante, BP. 262 CRRA de Sotuba, Mali,  
Chaire UNESCO pour l'Environnement, ISFRA.  
Centre d'Enseignement Supérieur de Bamako  
Contacts : s.s.traore@cgiar.org, cheikhamallafr@yahoo.fr

### Résumé

Depuis la fin des années 1970, la région sahélienne est touchée par une terrible sécheresse. Le but de la présente contribution est de caractériser la variabilité climatique dans le delta intérieur du Niger. La méthodologie utilisée consiste en l'analyse de la variable centrée réduite et dans le test de détection de rupture de Pettitt sur la série des débits et pluies. Les résultats de l'analyse de la variable centrée réduite montrent une forte variabilité des conditions hydro climatiques. Elle est marquée par une rupture en 1970 et 1971 respectivement pour les débits et la pluviométrie. Le déficit pluviométrique a affecté le régime hydrologique qui a été mis en évidence par un test de corrélation. La comparaison des périodes hydro climatiques confirme la tendance déficitaire.

**Mots clés :** Climat, sahel, sécheresse, hydrologie, delta, inondation, crue.

### Summary

Since the late 1970s, the Sahel region is affected by a severe drought. The goal of this article is to characterize climate variability in the Inner Niger Delta. The methodology involves the analysis of the standardized variable and the Pettitt break detection on the rainfall and flow data. The results of the standardized variable show a high variability of the hydro climatic conditions. It is marked

by a break in 1970 and 1971 respectively for the flow and the rainfall. The lack of rainfall has affected the hydrological regime which has been highlighted by a correlation test. The comparison of the hydro climatic periods confirms trend deficit.

**Key words:** Climate, Sahel, drought, hydrology, delta, flooding, flood.

### I. Introduction

La zone sahélienne de l'Afrique de l'Ouest est frappée, depuis plusieurs décennies, par une sécheresse plus ou moins sévère selon les années. Cette sécheresse, en cours depuis le début des années 1970, semble être la conséquence d'une forte variabilité climatique du fait d'une perturbation probable de la mousson Ouest Africaine (Bricquet *et al.*, 1996). Elle est caractérisée par une diminution de l'ordre de 20% à 30% de la pluviométrie et une baisse encore plus importante du débit des cours d'eau (Servat *et al.*, 1995 ; Paturel *et al.*, 1996).

Dans le delta intérieur du Niger, la diminution pluviométrique a entraîné des modifications dans le processus d'inondation des terres : les surfaces en eau, au moment du pic de crue, ont tendance à se réduire en même temps que se raccourcit la durée de la submersion. Les apports du Niger et du Bani sont passés de 80,2 km<sup>3</sup> pendant la décennie 50, à 30,7 km<sup>3</sup> pendant la décennie 80 (Courel *et al.*, 1997).

La topographie du milieu fait que l'ampleur de l'inondation est fonction des précipitations et des apports fluviaux.

L'objectif visé, par le présent travail, est de caractériser la variabilité climatique et son impact sur le processus d'inondation du delta intérieur du Niger. Ce travail se base sur l'hypothèse qu'il y a une forte relation entre la variabilité pluviométrique et le régime hydrologique.

Le delta intérieur du Niger, autrement connu sous le nom de delta central ou de cuvette lacustre, constitue l'un des traits les plus remarquables de l'hydrographie au Mali.

Situé en zone sahélienne semi aride, il est une vaste zone inondable d'environ 64 000 km<sup>2</sup> qui s'étire selon un axe Sud Ouest-Nord Est (de Ké-Macina à Tombouctou) sur plus de 350 km, entre les méridiens 2°30 et 6°30 degrés Ouest et les parallèles 13° et 17° degrés Nord. Il renferme plus de 70% du potentiel des terres irrigables du Mali (Sy, 1995, cité par Adésir, 1999) et il abrite environ 50% du cheptel malien grâce à ses vastes prairies naturelles ou « bourgoutières ». De plus, il assure la survie à une population allant de 200 000 à 300 000 personnes dépendantes du secteur de la pêche. Le fleuve Niger qui l'arrose, constitue un vecteur important de communication pour le pays.

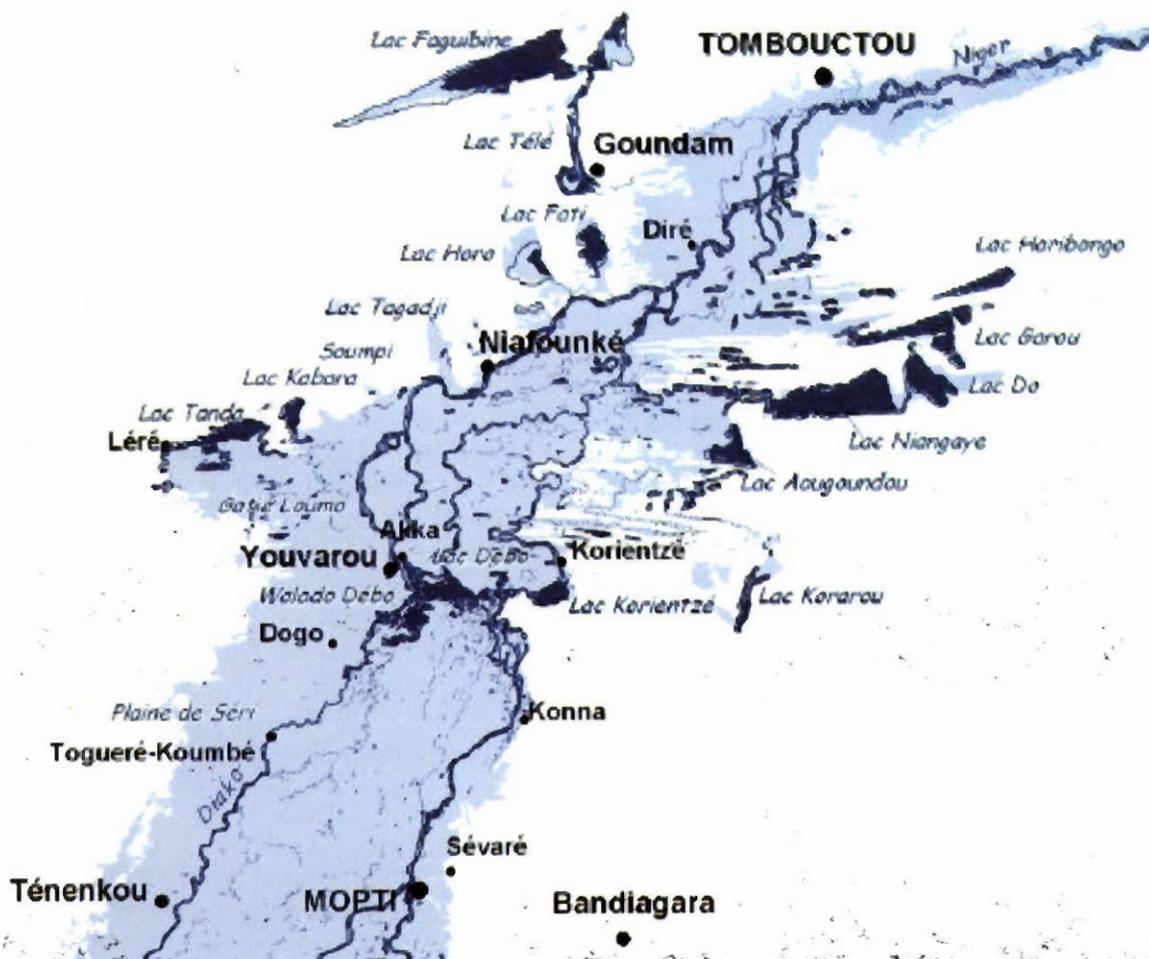


Figure 1. Localisation du site

## II. Matériels et Méthodes

### 2.1. Matériels

Les variables les mieux adaptées pour le suivi des modifications climatiques sont, sans doute, le débit des rivières ou fleuves, le niveau des lacs, les précipitations, les températures de l'air et de l'eau, etc. (Mitosek, 1992, cité par Sighomnou, 1994).

La non disponibilité des autres facteurs climatiques (ETP, vent, etc.), nous a conduit à nous limiter aux données de pluviométrie, de débit et de température. La pluviométrie se résume aux moyennes annuelles de 1951 à 2007 et la température, aux moyennes annuelles de 1971 à 2007. Toutes ces données sont de la station de Mopti, obtenues auprès de la Direction Nationale de la Météorologie (DNM). Les données hydrologiques portent sur les débits du fleuve Niger, à Mopti, de 1951 à 2007, obtenue auprès de la Direction Nationale de l'Hydraulique (DNH).

### 2.2. Méthodes

Pour cette étude l'examen des variabilités climatiques a été axé essentiellement sur l'analyse des caractéristiques de la température, des précipitations et des écoulements au niveau de la station de Mopti. Les méthodes utilisées sont l'indice de Nicholson pour les données climatiques et hydrologiques et le test de Pettitt (1979) pour la pluviométrie et les débits et une analyse de variance des périodes climatiques.

#### 2.2.1. Variables centrées réduites ou indice de Nicholson

L'indice de Nicholson, ici, mesure les écarts entre les variables étudiées par rapport à une moyenne établie sur une longue période. Il permet de différencier les années (ou les décennies) sèches/déficitaires et humides/excédentaires. Cet indice est calculé en tenant compte des normes de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) de 1980, qui expliquent qu'il faut, au minimum, une

période de 30 ans pour une étude valable. Pour chacun des paramètres, l'indice est calculé en fonction de la formule suivante :

$$(X_i - X_m) / \sigma, X$$

Avec :

$X_i$  = Moyenne de l'année étudiée,

$X_m$  = Moyenne interannuelle de la variable sur la période de référence,

$\sigma$  = Ecart type de la variable sur la même période de référence.

Afin de conserver à l'indice une homogénéité statistique, il est calculé pour l'ensemble des variables étudiées pour une période de références homogène.

#### 2.2.2. Le test de Pettitt

Le but de ce test est d'analyser les données aux fins de la détection d'une rupture éventuelle constitutive dans les séries. Une rupture est un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu.

Le test de Pettitt est non-paramétrique et dérive de celui de Mann-Whitney. L'absence de rupture dans une série ( $X_i$ ) de taille  $N$  constitue l'hypothèse nulle. Sa mise en œuvre suppose que pour tout instant  $t$  compris entre 1 et  $N$ , les séries chronologiques, ( $X_i$ )  $i-1$  à  $t$  et  $t+1$  à  $N$ , appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable  $U_t, N$  définie par :

$$U_t, N = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}$$

où  $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$  avec  $\text{sgn}(x) = 1$  si  $x > 0$ , 0 si  $x = 0$  et  $-1$  si  $x < 0$

Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant  $t$  définissant le maximum en valeur absolue de la variable  $U_t, N$ .

### 2.2.3. Analyse de variance

Les moyennes des périodes hydro climatiques 1951-1970, 1951-1980, 1971-2000 et 2001-2007 sont comparées afin de voir s'il y a une différence significative entre eux. La période 1951-1970 qui correspond à la période humide ou période des deux décennies humides (Sircoulon, 1987), la normale 1951-1980 intègre la période humide et sèche, la période 1971-2000 qui regroupe les trois (3) décennies déficitaires (Sighomnou, 1994), il s'agit de la dernière période normale, la période 2001-2007 qui représente la période récente. Le test utilisé est un ANOVA.

## III. Résultats

### 3.1. Évolution de la température

Les variables étudiées sont la température moyenne annuelle, les températures maximales et minimales moyennes annuelles ainsi que l'amplitude thermique annuelle moyenne. La non stationnarité des séries chronologiques de température ayant été rejetée dans tous les cas (très probablement en raison de la faiblesse des amplitudes de variation), seules les analyses

des indices de température annuelle (variable centrée réduite) sont appliquées.

Comme on peut le constater, la figure 2 montre une forte variabilité de la température ; elle est située, globalement, en dessus de la moyenne depuis 1983. L'application de la même technique d'analyse, appliquée aux températures minimales et maximales pour la même période, montre une tendance similaire à celle des températures moyennes.

### 3.2. Évolution de la pluviométrie

Le calcul de l'indice de Nicholson (Figure 3) a permis d'analyser la variabilité des précipitations à Mopti. Le résultat montre que la zone est touchée par des poches de sécheresse. Malgré une reprise de la pluviométrie avec quelques années humides, comme 1994 (635,6 mm), 1999 (573 mm) et 2004 (654.6 mm), la sécheresse persiste.

Cette situation, à la station de Mopti, est conforme à la plupart des travaux effectués en Afrique de l'Ouest et, principalement, dans les stations du Mali.

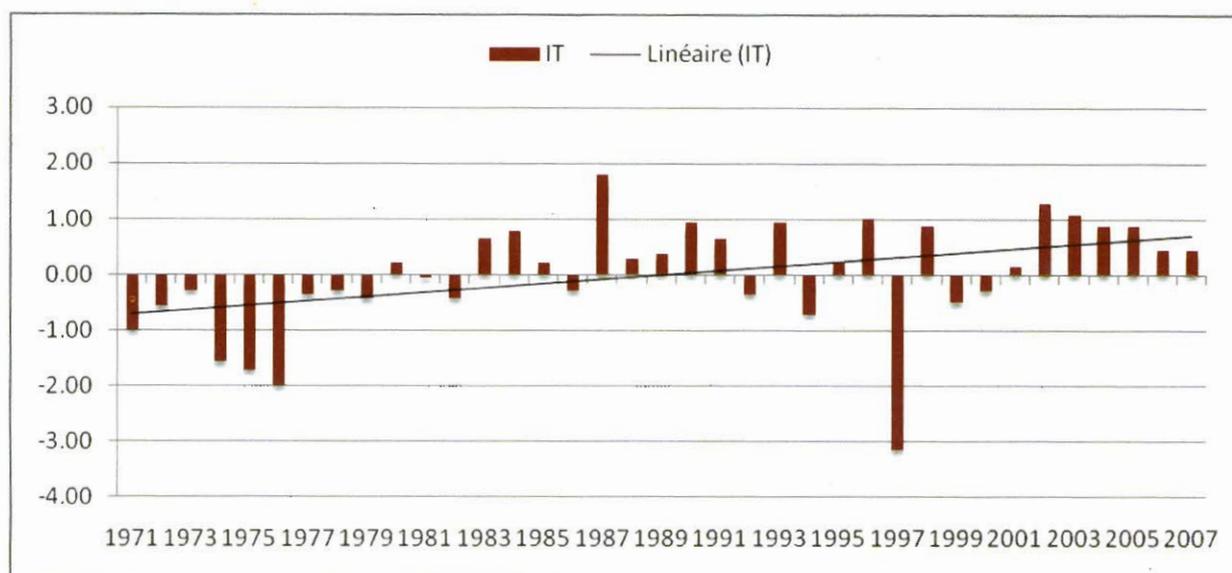


Figure 2. Variabilité de l'indice de température à Mopti (1971-2007)

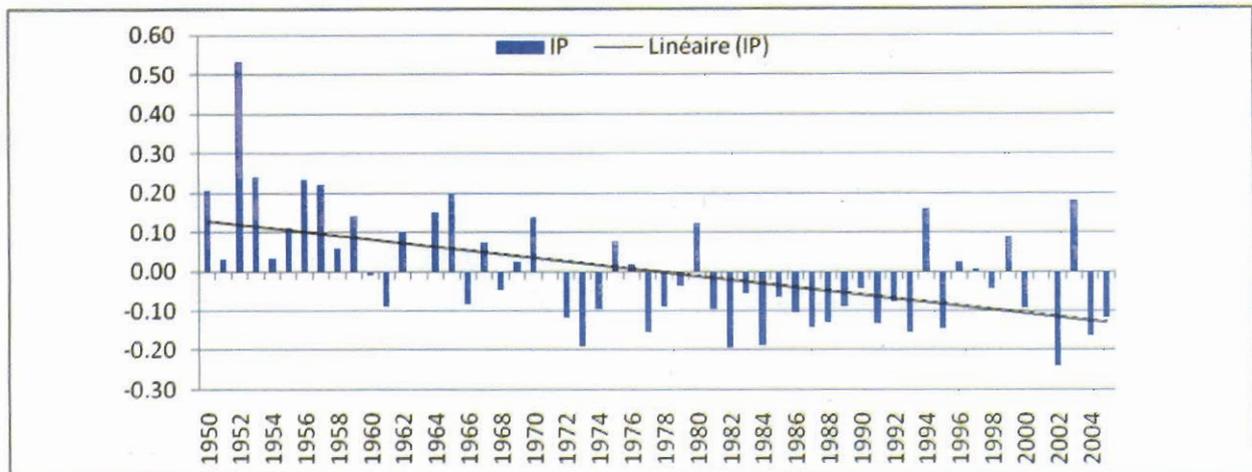


Figure 3. Indice de pluie à la station de Mopti (1950-2004)

La non-stationnarité des séries chronologiques de mesure se traduit par une segmentation en séquences statistiquement différentes. Le logiciel Khronostat a été utilisé pour cela. Les résultats du test de Pettitt montrent que la série pluviométrique analysée présente une rupture au seuil de confiance de 90%. Cette rupture se situe à partir de 1971.

### 3.3. Variation des modules

Pour analyser les variations de l'écoulement, le choix du bassin versant, comme unité spatiale d'étude, s'impose car il représente une unité homogène hydrologiquement close. Nous étudions cette évolution à partir des débits mesurés à la station de Mopti (Figure 4).

La période de plus forts débits entre 1951 et 2007 a été marquée par les crues de la période humide 1951-1961, et les crues excédentaires de 1994 et 1999. Des années de grands déficits d'écoulement comme 1971-1975, 1980-1993 et 2002 sont observées sur la période 1951-2007. Cette tendance persistante mérite d'être soulignée, montrant une dégradation durable des conditions du système hydrologique sur tout l'espace d'étude, malgré un retour à de meilleures conditions de précipitations après en 1994 et 1999.

Les résultats de l'homogénéité des séries viennent confirmer ces premiers résultats. Les résultats du test de Pettitt, appliqués sur la série avec le logiciel Khronostat, montrent bien une rupture au seuil de 90% en 1970.

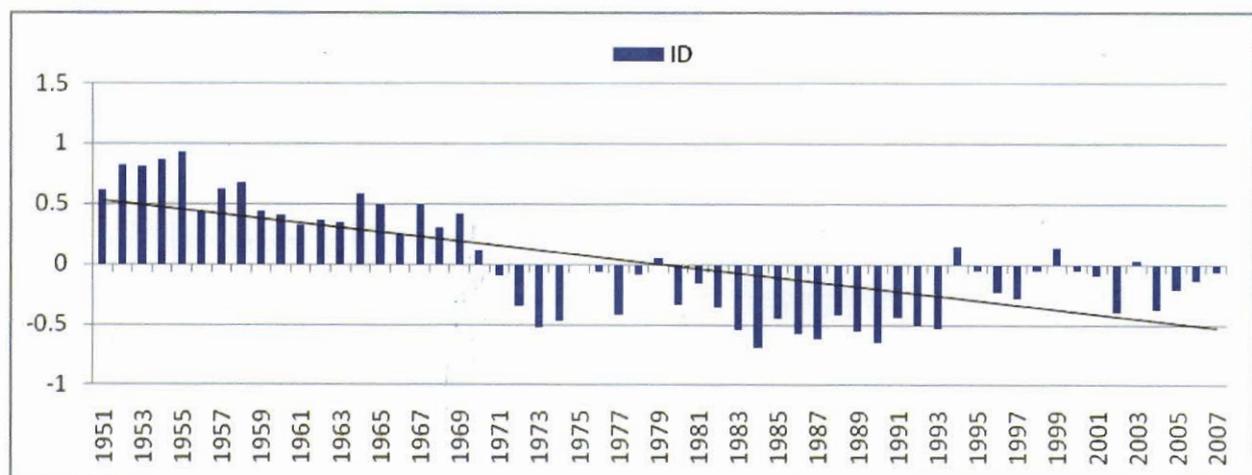


Figure 4. Évolution de l'indice de débit à la station de Mopti (période 1951-2007)

## IV. Impact de la variabilité climatique sur les écoulements et débit des crues

### 4.1. Évolution des conditions hydrologiques

Les débits moyens mensuels à Mopti sont variables d'une année à une autre. L'étendue des surfaces inondées est proportionnelle à l'importance des débits. Les surfaces inondées du delta intérieur apparaissent très sensibles à de faibles variations de hauteur de la crue puisque, la perte de surface inondée est de 7% par tranche de 10 cm autour de la crue « climax » à 6,60 m et se stabilise à 5% par tranche de 10 cm entre 6,40 m et 5,10 m, valeurs séparant une bonne crue d'une crue très faible.

À 5,10 m (depuis 1944 les hauteurs de crue n'ont été ni égales ni inférieures à cette valeur que sept fois entre 1983 et 1993), la perte de surface inondée atteint 80% alors que la production des pâturages chute d'environ 40%<sup>1</sup>.

Les débits mensuels calculés sont présentés sur la figure 5. La forte variabilité des débits mensuels est une des caractéristiques générales du régime des fleuves au Mali.

À une année excédentaire les superficies maximales inondées peuvent atteindre 19 000 km<sup>2</sup> pour une hauteur d'eau de 6,60 m à Mopti contre 3 600 km<sup>2</sup> pour une hauteur de 5,00 m.

### 4.2. Relation entre la pluie et le débit

Le test statistique appliqué sur les données montre une relation très significative entre les pluies et les débits à un intervalle de confiance de 95%. La figure 6 montre l'évolution des cumuls de pluie et de débit à Mopti. Le coefficient de corrélation  $r^2$  est de 0,71. Cependant, les données sont fortement corrélées pendant les années excédentaires et faiblement corrélées pendant les années sèches. Cette forte corrélation n'a cependant pas d'impact majeur sur l'inondation du delta car, selon Mahé *et al.* (2002), 90% de l'eau qui inonde le delta provient des apports en eau de la Guinée et du Nord de la Côte d'Ivoire.

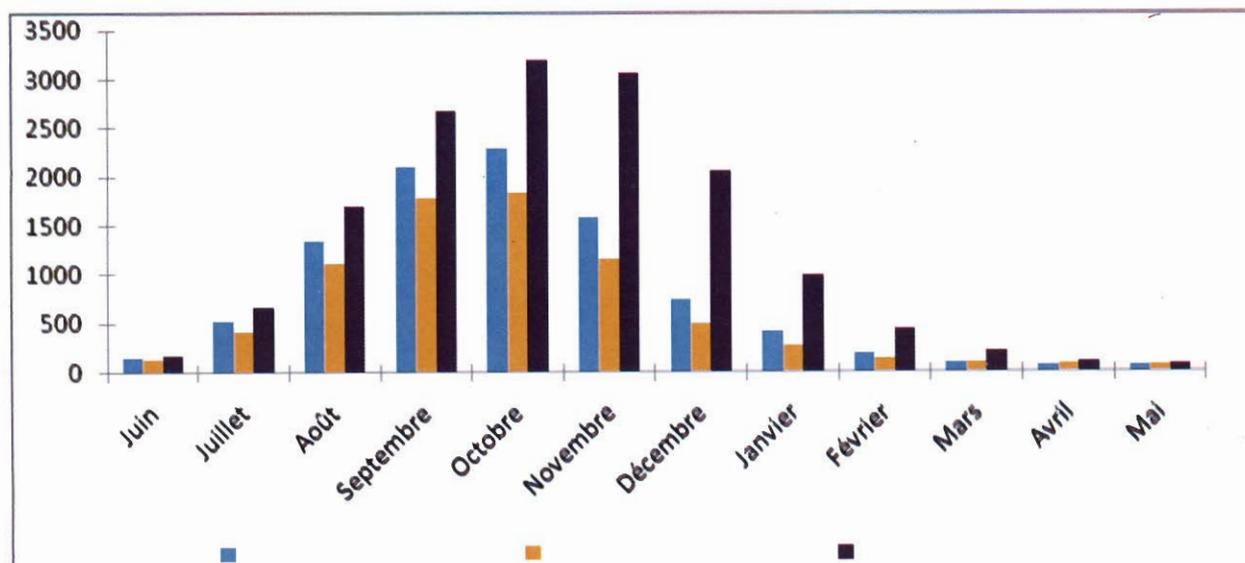


Figure 5. Évolution de l'inondation pendant trois périodes

<sup>1</sup>IRD 2007

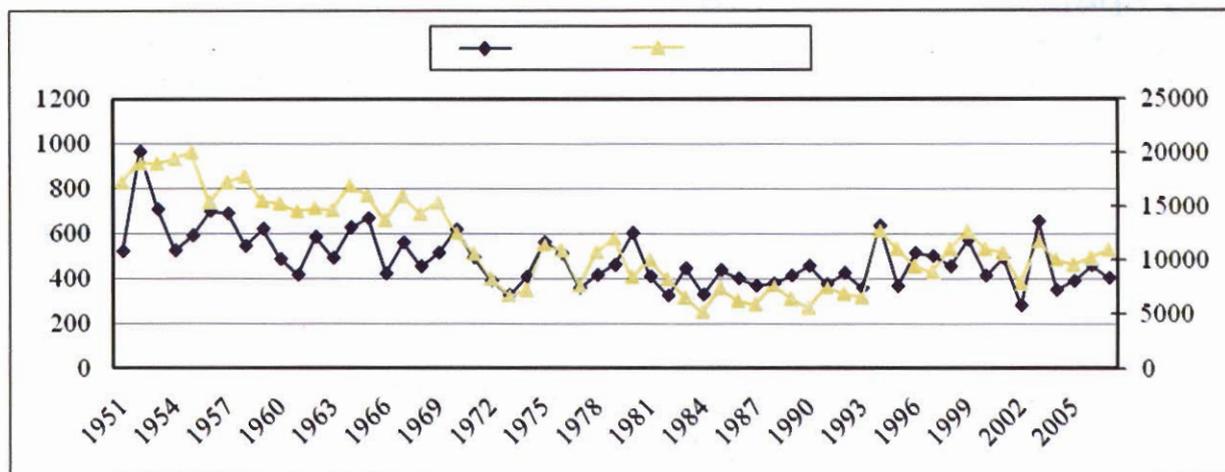


Figure 6. Évolution comparée des cumuls de la pluie et du débit à Mopti

### 4.3. Comparaison des périodes climatiques

La valeur P du test F d'ANOVA est inférieure à 0.05, ce qui confirme l'existence d'une différence statistiquement significative entre les moyennes des quatre (4) variables, avec un intervalle de confiance de 95,0%.

Les résultats ne montrent pas de différence significative entre les périodes : 1951-1970 et 1951-1980, 1951-1980 et 2001-2007, 1971-2000 et 2001-2007. Par contre, les périodes : 1951-1970 et 1971-2000, 1951-1980 et 1971-2000 montrent une différence significative. En définitive, les périodes 1971-2000 et 2001-

2007 se démarquent complètement des autres périodes. Ce qui explique une diminution de la pluviométrie et des débits de manière significative. La figure 7 montre la distribution normale des différentes périodes.

Les résultats obtenus confirment une baisse des pluies et des débits, depuis plus d'un demi-siècle, dans la région. Cette baisse des conditions hydro climatiques est caractérisée par une diminution des cumuls de pluie et de débit à la station de Mopti. Malgré quelques années humides, la sécheresse persiste toujours. On en déduit que la variabilité climatique a eu un impact négatif sur les conditions hydro climatiques de la région.

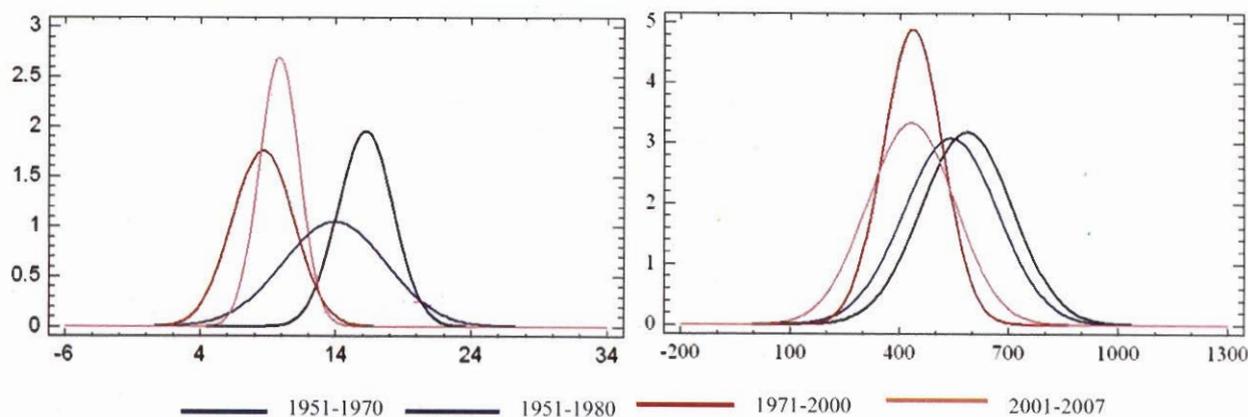


Figure 7. Distribution normale des périodes hydro climatiques

La fluctuation interannuelle de la pluviométrie est assez importante à Mopti. Les périodes de déficit et d'excédents pluviométriques apparaissent nettement. L'évolution de la pluviométrie est caractérisée par une rupture en 1971. Cette rupture montre que la zone s'intègre dans la fluctuation du régime pluviométrique observée depuis la fin des années 1960 et début 1970 en Afrique de l'Ouest (Paturel *et al.*, 1996). Comme signalés par Sircoulon, (1987) ; Mahé *et al.*, (2000), les années 1970 constituent une période très représentative de l'importante chute de la pluviométrie en Afrique et au Mali, caractérisée par une diminution des pluies dans toute l'Afrique occidentale.

La variabilité hydrologique est caractérisée par une rupture en 1970. Cette rupture confirme celle de la pluviométrie. Bricquet *et al.*, (1995), notent une baisse persistante des écoulements sur le bassin du Niger à Koulikoro (120 000 km<sup>2</sup>). Malgré une baisse notable des pluies, qui n'est que de 20% en valeur décennale entre 1951-1961 et 1981-1989, celle des écoulements serait de 55%. La plus grande baisse des écoulements par rapport à celle de la pluviométrie peut être liée à la longue durée du déficit pluviométrique. La succession des années à pluviométrie déficitaire marque aussi négativement l'hydrologie.

La bonne relation entre précipitation et module confirme l'hypothèse de départ. Le régime hydrologique est largement influencé par la fluctuation pluviométrique. L'évolution des débits et des hauteurs du Niger et du Bani est identique à celle de la pluviométrie. Elle est marquée par les mêmes variabilités interannuelles. Il existe en effet une extrême correspondance entre l'évolution de la pluviométrie et des débits du Niger depuis 1950 vérifiée par Adésir S. (1999).

Les courbes évolutives des deux périodes hydro climatiques récentes se démarquent nettement des deux périodes humides. Celle-ci s'explique par une diminution plus marquée de la pluie et des débits pendant les trois dernières décennies.

Outre l'analyse et la compréhension des aspects mondiaux de la variabilité climatiques et ses conséquences sur l'environnement, la présente étude s'est proposée d'approfondir les connaissances sur la variabilité temporelle des régimes pluviométriques et hydrologique du terroir de Kadiol. Les analyses des données hydro climatiques disponibles ont permis d'identifier les manifestations de la variabilité climatique et de la sécheresse observée depuis plusieurs décennies. Cette période est caractérisée par une hausse des températures et une baisse généralisée des précipitations ainsi que des écoulements sur la zone. En dépit de quelques années humides enregistrées (1994, 1999, 2004), aucun indice précis ne permet d'augurer une fin du phénomène dans la zone du delta comme ailleurs au Mali ou en Afrique. Au terme de cette étude nous jugeons nécessaire que les recherches de prévision climatiques doivent coupler les prévisions scientifiques à celles basées sur les connaissances locales.

Adésir M., 1999. *L'herbe, le poisson et le riz : Transformation des paysages et dynamiques paysannes dans le Kotiya (Delta central du Niger, Mali)*. Paris : Thèse Doctorat de géographie de l'Université de Paris I p 497.

Bricquet J. P., Mahé G., Bamba F., & Olivry J. C., 1996. *Changements climatiques récents et modification du régime hydrologique à Koulikoro*, IAHS Pub. No. 238.

Courel M.F, Chamard P. C., Adésir-Schilling M, & Diakité C.H, 1997. *L'inondation des plaines du Delta Intérieur du Niger (Mali). Tentatives de contrôle : la réalité et les risques*. Sécheresse, n°3, vol 8, sept, pp.151-156.

Hubert P., Carbone J.P., 1987. *Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest*. *Journal of Hydrology*, 95, pp 165-183.

Mahé G., Bamba F., Orange D., Fofana L., Kuper M., Marieu B., Soumaguel A., Cissé., 2002. *Dynamique Hydrologique du delta intérieur du Niger*, Gestion intégrée des ressources naturelles en

- zone inondables tropicales, colloques et séminaires, pp179-195.
- Mahé G., Olivry J.C., Dessouassi R., Orange D., Bamba F., Servat E., 2000. Relations eaux de surface – eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Série Ila, 330, 689-692.
- Paturel, J.P., Servat, E., Delattre, M.O., Lubes, H., Fristch, J.M., 1996. *Etude de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne*, pub. XII<sup>ème</sup> journée hydrologique de l'ORSTOM, Montpellier 8p.
- Roubinet D., 2006. *Variabilité climatique et leur impact sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest et du Centre*, Rapport de stage INSA Toulouse, 132p.
- Servat E., Sakho M., 1995. *Instability of water resources and management of a planned water system in non-sahelian West Africa*, Hydrological Sciences – Journal des sciences hydrologiques, 40, pp 217-230.
- Sighomnou D., 2004. *Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : Perspectives d'évolution des ressources en eau*. Thèse de Doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Yaoundé 1, Cameroun, 291 p.
- Sircoulon J., 1987. *Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'Ouest depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle*, IAHS pub no 168, 13p.
- Pettitt AN.A., 1979. *Non parametric approach to the change point problem*. *Applied statistics*, 28: 126-35.

# Domestication du *Stylosanthes erecta* P. Beauv « Segufali »

## *Stylosanthes erecta* P. Beauv "Segufali" domestication

Tangara T.<sup>1</sup>, Ouattara S.<sup>1</sup>, Soumaré S.<sup>2</sup>, Maïga S. Z.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centre Régional de Recherche Agronomique de Sotuba, BP 262 Bamako

<sup>2</sup>Institut d'Economie Rurale, BP 258 Bamako

<sup>3</sup>Faculté des Sciences et Techniques, BP E 478 Bamako

<sup>1</sup>BP 258, Bamako Mali ; tahirou.tangara@yahoo.fr

### Résumé

Le *Stylosanthes erecta* est représenté dans la flore spontanée du Mali.

Les activités de domestication de cette plante portent sur : le comportement, la mise au point des techniques agronomiques de semis, d'utilisation, d'entretien et d'évaluation de ses performances dans les terroirs villageois et en station.

Le *Stylosanthes erecta* se comporte en plante pérenne aussi bien en station qu'en milieu paysan avec un taux de survie de 100 % en deuxième année.

Les résultats des analyses bromatologiques montrent que le *Stylosanthes erecta* en milieu paysan est plus riche en Ca (2,03 à 2,56) que celui de la Station de Sotuba 1,8%. Il est moins riche en protéines brutes (7,19 à 9 en milieu paysan contre 10,83 à 13,75 en station).

Il améliore le taux de matière organique du sol de 57 à 200 %.

**Mots clés :** Domestication, *Stylosanthes erecta*, légumineuse, fourrage, pharmacopée, agro-écologie, germination.

### Abstract

*Stylosanthes erecta* is represented in the spontaneous flora of Mali. Domestication activities of this plant include: the behavior, the development of agronomic planting techniques, use, maintenance

and evaluation of its performance in the village environment and on-station. *Stylosanthes erecta* behaves as a perennial both on-station and on-farm with a survival rate of 100% in the second year. Bromatological analysis results show that *Stylosanthes erecta* on-farm is richer in Ca (2.03 to 2.56) than that of station (1.8%). It is less rich in crude protein (7.19 to 9 on-farm against 10.83 to 13.75 on-station). It improves the rate of soil organic matter from 57 to 200%.

**Keywords:** Domestication, *Stylosanthes erecta*, legume, fodder, medicines, agro-ecology, germination.

### I. Introduction

Le genre *Stylosanthes* comprend plus de 30 espèces pour la plupart originaires d'Amérique du Sud et d'Amérique Centrale excepté *Stylosanthes erecta* et *Stylosanthes fruticosa* qui sont originaires d'Afrique (J. Hanson and J.H. Herring, 1999 ; Lebas F. 2004 ; Boudet, 1975).

Le *Stylosanthes erecta* P. Beauv est une plante légumineuse naturelle qui est présente dans plusieurs pays d'Afrique : Kenya, Tanzanie, Zanzibar en Afrique de l'Est, République du Congo Démocratique en Afrique Central, Bénin, Côte d'Ivoire, Ghana, Libéria, Niger, Nigéria, Sénégal, Sierra Léone, Togo et Mali en Afrique de l'Ouest, Angola en Afrique du Sud (Alexis Billes et col., 2001). Au Mali, il est recensé avec les autres espèces spontanées dans les études du tapis herbacé (Yossi et

al. 2001), mais il existe peu de données techniques relatives à sa domestication. C'est une espèce très appréciée par les animaux au niveau des pâturages naturels (Alexis Billes et col. 2001) et fait l'objet d'usages multiples. C'est une plante pluriannuelle, tolérante à la sécheresse et aux attaques des termites. Il a des vertus thérapeutiques en plus de son utilisation dans l'alimentation du bétail. Comme les autres légumineuses, il contribue à améliorer la fertilité des sols (Sissoko, 2001; Yossi *et al.* 2001 ; Fomba et Bosma, 1994).

D'autre part, sa biomasse fait aussi l'objet de vente très fréquente au niveau de différents marchés locaux comme médicaments pour satisfaire les besoins de la pharmacopée traditionnelle. Au regard de la multitude de ses usages et de ses utilisateurs, il est soumis à une exploitation intense et incontrôlée. Cette surexploitation a pour conséquence une diminution du couvert végétal et la dégradation des pâturages naturels se traduisant par sa disparition sans aucune mesure de préservation. Au Mali, l'exploitation du *Stylosanthes erecta* P. Beauv se fait à tous les stades de son développement de la plante. Elle commence à être rare dans des endroits où elle a été très abondante (pâturage de Sotuba, centre de formation forestière de Tabakoro, village de Falan, ville de Ségou et alentours, ville de Koulikoro et alentours, etc.). Face à ce constat, sa disparition est certaine si des techniques de reproduction, de protection et de mise en valeur ne sont pas identifiées et mises en application. Il apparaît nécessaire et urgent de trouver des méthodes de conservation pour une utilisation durable et une préservation des écosystèmes fragiles qui l'abritent. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les activités de la présente étude. Elle a été menée en milieu paysan, dans la zone d'encadrement de l'Office Haute Vallée du Niger (OHVN), aux alentours de la ville de Ségou dans un rayon de 50 km et à la Station de Recherche Agronomique de Sotuba. Elle a permis d'évaluer les connaissances locales sur la plante, de la caractériser sur les plans physiologique et pharmacologique, de maîtriser les techniques de propagation et de gestion et d'évaluer ses effets sur la fertilité du sol. L'objectif visé a été la valorisation des ressources végétales locales.

## II. Matériel et méthodes

### 2.1. Matériel

Le matériel végétal était constitué essentiellement de *Stylosanthes erecta* P. Beauv.

Les semences utilisées ont été obtenues à partir des stocks en bottes achetés sur les différents marchés. Pour la reconstitution de différents types de sol, le terreau a été utilisé dans certaines parcelles en station.

### 2.2. Méthodologie

Des enquêtes quantitatives et qualitatives ont été menées pour identifier les savoirs locaux sur le *Stylosanthes erecta* et la perception paysanne sur les plantes à usages multiples. Elles ont permis d'identifier les espaces couverts par *Stylosanthes erecta*, les espaces exploités, les peuplements importants et les différents usagers etc. Ces enquêtes ont été menées en deux phases :

- La première phase dite phase « exploratoire » a été conduite au niveau des services techniques du monde rural (agriculture, élevage, conservation de la nature) et des différentes catégories d'utilisateurs (paysans, éleveurs, tradithérapeutes, herboristes, personnes ressources) de la région de Koulikoro, de la ville de Ségou et des marchés des localités de Bamako, Siby, Koulikoro, Ouélessébougou, etc. Elles ont permis d'identifier les différentes zones de peuplements du *Stylosanthes erecta* P Beauv et de choisir deux sites de recherche par zone d'étude.

Les villages ont été choisis suivant les critères d'accessibilité en toutes saisons, de la disponibilité des populations de collaborer avec la recherche et de l'abondance du *Stylosanthes erecta* dans le terroir. Les choix ont été faits avec la participation des partenaires (services techniques et personnes ressources). Les villages suivants ont été ainsi choisis :

- zone OHVN : les villages de Kafara à 20 km du chef-lieu de la commune de Ouélessébougou et de Siby (chef-lieu de commune rurale) situé à 45 km de Bamako ;

- zone de Ségou : les villages de Faïra à 20 km à l'Est de la commune urbaine et Sakoïba à 20 km au Nord.
- La seconde phase d'enquêtes focalisée sur l'évaluation des connaissances locales et des perceptions paysannes sur le *Stylosanthes erecta* a été menée sur les sites de recherche au niveau des exploitations agricoles et des différentes catégories d'usagers desdites localités à savoir: les guérisseurs et guérisseuses traditionnels, les herboristes, les éleveurs. Un échantillon de 20 personnes par village, appartenant à toutes les catégories socioprofessionnelles utilisatrices du *Stylosanthes erecta*, a été enquêté.

La méthode du Diagnostic Participatif (DP) à partir d'outils tels que: cartes, profils, interviews semi structurées, et la méthode d'enquête classique à travers des questionnaires, a été utilisée pour la collecte des données.

Dans le cadre du processus de la domestication, des suivis de la phénologie et du comportement ont été effectués au niveau des parcelles de *Stylosanthes erecta* installées dans les villages de recherche et à la Station de Sotuba. En parallèle, des analyses ont été effectuées aux laboratoires pour évaluer ses qualités bromatologique, pharmacologique et toxicologique, les effets sur la fertilité des sols.

### III. Résultats

#### 3.1. Évaluation des connaissances locales sur le *Stylosanthes erecta*

##### 3.1.1. Identification des aires de peuplement du *Stylosanthes erecta*

Les enquêtes ont permis d'identifier des aires de peuplements du *Stylosanthes erecta* dans plusieurs terroirs villageois de la zone OHVN et aux alentours de Ségou.

Ces peuplements naturels ont été rencontrés surtout dans les jachères, les zones de pâturages, les forêts où la plante existe généralement en association avec le *Guiera senegalensis*.

##### 3.1.2. Perception paysanne sur le *Stylosanthes erecta*

###### 3.1.2.1. Les appellations en langues locales

Le nom en langues locales du *Stylosanthes erecta* varie d'un terroir à un autre.

Chaque nom semble lié à une utilisation particulière.

Les différentes appellations recensées au cours des enquêtes sont notées dans le tableau I.

**Tableau I.** Appellations en langues locales du *Stylosanthes erecta* selon les zones

Zones	Appellations en langues locales	Signification (en français)
Bamako et environs	<i>Moritaba</i> <i>Djofaga</i> <i>Segufali</i>	Tabac des marabouts Anti-fétiches
Ségou et environs	<i>Séguéfali</i> <i>Sélifali</i> <i>Wa koro n'ganiaka</i> <i>Segufali</i>	Limite la prolifération du striga En association avec l' <u>Andropogon</u>
Siby et environs	<i>Doucouma n'guniaka</i>	-
Koulikoro,	<i>Missinaga</i> <i>Segufali</i>	Dessous de bovin
Ouéléssébougou	<i>Tilé yéléme</i>	Plante qui suit l'orientation du soleil

### 3.1.2.2. Les utilisations traditionnelles et « modernes »

Le *Stylosanthes erecta* est utilisé comme fourrage pour les animaux.

Il est commercialisé par les tradithérapeutes pour soigner : le paludisme, la bilharziose, les pathologies urinaires, le malaise de dentition chez les enfants. En plus, il est utilisé pour protéger contre les mauvais sorts.

Actuellement c'est une plante qui est aussi utilisée par la médecine moderne.

Les travaux de recherche sur les plantes médicinales menés au Mali, par Sanogo *et al.*, 2006 ont révélé des qualités médicales du *Stylosanthes erecta* P. Beauv. Ils ont trouvé que des extraits de recettes contenant du *Stylosanthes erecta* P. Beauv ont démontré une activité antibactérienne contre les souches cliniques de *Escherichia coli*, responsable de 75 à 80 % des infections urinaires. Les mêmes extraits ont démontré une activité antalgique contre la douleur provoquée par l'acide acétique chez les souris.

À l'instar du *Stylosanthes hamata* (plante exotique), le *Stylosanthes erecta* fertilise aussi le sol.

### 3.1.2.3. Les prélèvements et la conservation

Le *Stylosanthes erecta* est collecté par les paysans et les paysannes à l'état frais soit par coupe des tiges soit par arrachage des pieds. Il est conservé à l'état sec sous forme de bottes ou en poudre (forme de conservation très rare).

La photo 1 montre la méthode de conservation sous forme de bottes.

Les prélèvements à l'état frais avant la maturation des graines compromettent dangereusement la survie de la plante.

Le tableau II donne les différentes pratiques de conservation traditionnelle du *Stylosanthes erecta*.

La conservation sous forme de bottes séchées est la plus pratiquée par les paysans et les guérisseurs tradithérapeutes.

### 3.1.2.4. La commercialisation des prélèvements

Le *Stylosanthes erecta* est utilisé comme tisane en plus de son emploi dans la médecine traditionnelle et même celle dite moderne. Pour ces différentes utilisations, il suit un circuit commercial comportant des fournisseurs et des revendeurs (des tradithérapeutes). Il est vendu généralement à l'état sec sous forme de bottes. Les bottes pèsent en moyenne 600 à 650 g l'unité.

La botte est vendue à 25 fcfa par les fournisseurs et revendue à 50 fcfa par les revendeurs et revendeuses au niveau des marchés communaux.

La demande est surtout forte au mois de ramadan musulman. À cette période le prix de la botte dépasse les 50 fcfa au niveau des marchés des centres urbains.

**Tableau II.** Pratiques paysannes de conservation du *Stylosanthes erecta*

Pratiques de conservation	Nombre de paysans et paysannes	Fréquence (%)
Bottes séchées	78	98
Poudre	2	2
Total	80	100



Photo 1. Modes de conservation du *Stylosanthes erecta* P. Beauv

### 3.2. Étude de la phénologie et du comportement du *Stylosanthes erecta*

#### 3.2.1. Répartition du *Stylosanthes erecta* sur les types de sol

Le *Stylosanthes erecta* était présent sur tous les types de sol visités à savoir : argileux,

sableux, gravillonnaire, marécageux, argilo-sableux, sablo-argileux, limono-sableux et limono-argileux sauf les sols latéritiques. La répartition du *Stylosanthes erecta* P. Beauv sur les différents types de sol est donnée au tableau III.

Tableau III. Répartition du *Stylosanthes erecta* sur les types de sol

Types de sol	Nombre de paysans et de paysannes	Fréquence (%)
Argilo-sableux	24	30
Gravillonnaire	21	26*
Argileux	15	19
Sableux	8	10
Limono-sableux	4	5
Limono-argileux	3	4
Sablo-argileux	3	4
Marécageux	2	2
Total	80	100

\*26 % des paysans et paysannes enquêtés pensent que la présence régulière du *Stylosanthes erecta* sur les sols gravillonnaires est surtout due au fait que ces parties des terroirs sont peu cultivées.

### 3.2.2. Suivi de la phénologie du *Stylosanthes erecta* P. Beauv

#### 3.2.3.1. Suivi de la germination

Le suivi de la germination a été mené au niveau des parcelles de *Stylosanthes erecta* installées en station à Sotuba et les villages de recherche.

##### ► Villages de recherche

Le taux de germination des semences a été dans l'ensemble très faible sur toutes les parcelles des quatre localités. Il a varié de 2% à 30% selon les sites.

Ce faible taux de germination serait dû à la qualité des semences obtenues à partir des bottes de *Stylosanthes erecta* collectées auprès des tradithérapeutes et au niveau des villages.

Les plantes ont été très souvent prélevées avant la maturation des graines.

Le taux de germination de 30% obtenu à Kafara est nettement plus élevé que celui des autres villages. Le plus faible taux enregistré à Siby (2%) est certainement dû à la pluie torrentielle intervenue aussitôt après les semis, qui aurait emporté les graines.

##### ► Station Sotuba

En station à Sotuba le taux de germination du *Stylosanthes erecta* sur différents types de sol a varié de 21 à 35%. Le taux le plus élevé (35%) a été enregistré sur la parcelle dont le sol est constitué uniquement de terreau et le plus faible sur la parcelle dont le sol est composé de terre + terreau.

#### 3.2.3.2. Suivi phénologique

Les périodes d'apparition des premières fleurs et la maturation des premières graines observées dans les différents terroirs villageois des sites de recherche se situent respectivement vers la fin des mois d'octobre et de novembre.

La plante perd toutes ses feuilles en saison sèche quand les conditions climatiques ne sont plus favorables.

La survie de la plante est surtout due à la dissémination naturelle des graines.

L'acquisition de semences en quantité importante reste une contrainte majeure pour le maintien de l'espèce, car les usagers du *Stylosanthes erecta* ne sont pas habitués à la récolte de semences. La survie de la plante est surtout due au semis naturel.

Les photos 2 et 3 donnent les différentes formes de présentation des graines du *Stylosanthes erecta*.



Photo 2. Graines de *Stylosanthes erecta* P. Beauv grossies au microscope



Photo 3. Stock de graines de *Stylosanthes erecta*

### 3.2.3. Suivi du comportement du *Stylosanthes erecta* P. Beauv

Le suivi du comportement a concerné le taux de survie des plantes de la levée (mois d'août) à la récolte (mois d'avril). Le comptage de l'ensemble des plantes a permis d'évaluer le taux de survie des plants sur tous les sites de recherche.

#### ► Villages de recherche

Le taux de survie des plantes a varié de 91 % à Faïra à 100 % à Kafara et Siby.

#### ► Station Sotuba

En station, du mois d'août 2007 à avril 2008, aucune mortalité de plante n'a été enregistrée.

Les photos 4 et 5 montrent différents stades de végétation du *Stylosanthes erecta* (croissance, floraison).



**Photo 4.** *Stylosanthes erecta* P. Beauv dans sa phase de croissance en Station à Sotuba



**Photo 5.** *Stylosanthes erecta* en floraison à la Station à Sotuba

**Tableau IV.** Composition chimique du *Stylosanthes erecta* P. Beauv en milieu paysan

Éléments	Siby	Kafara	Sakoïba
Matière sèche	93,90	94,40	94,25
Cellulose brute	31,63	45,23	42,97
Protéines brutes	7,19	9,00	7,94
Phosphore	0,14	0,05	0,05
Calcium	<b>2,56</b>	<b>2,53</b>	<b>2,03</b>
Matière grasse	2,29	2,33	3,45

Source : Laboratoire de Nutrition Animale (LNA) 2009

**Tableau V.** Composition chimique du *Stylosanthes erecta* P. Beauv en station et dans la nature

Eléments	T 1 : Sol : 1 volume de terreau + 1 volume de sable + 1 volume de fumier	T 2 : Sol : 1 volume de terreau + 1 volume de terre	T 3 : Sol : terreau sans mélange	T4 : Stylo naturel
Matière sèche	94,40	94,00	94,05	92,00
Protéines	10,92	10,83	13,75	13,58
Cellulose	31,35	37,76	25,62	50,97
Matière grasse	5,40	2,02	6,27	2,39
Phosphore	0,095	0,095	0,12	0,06
Calcium	<b>1,85</b>	<b>1,48</b>	<b>1,87</b>	<b>1,39</b>

Source : Laboratoire de Nutrition Animale (LNA) 2009

Les résultats des analyses montrent que le *Stylosanthes erecta* en milieu paysan est plus riche en Ca (2,03 à 2,56) qu'à celui de la Station de Sotuba 1,8 %. Il est moins riche en protéines brutes (7,19 à 9 contre 10,83 à 13,75).

### 3.3.2. Analyses pharmacologiques

L'analyse phytochimique a concerné les composés phénoliques (tanins catéchiques et galliques, flavonoïdes), les alcaloïdes totaux, les terpènes (saponosides) et les anthracénates qui sont des métabolites secondaires. Des tests de caractérisation des oses et des acides aminés ont été faits.

**Tableau VI.** Composition phytochimique du *Stylosanthes erecta* P. Beauv

Métabolites	Réactifs utilisés	Résultats	
Tanins	Tanins catéchiques	HCl ; réactif de Stiasny	+++
	Tanins galliques	Réactif de Stiansy ; Acétate de Soduim FeCl <sub>3</sub> ; Méthanol	++
Flavonoïdes	Flavones	Cyanidine	+++
	Cathéchols	Cyanidine	+++
	Anthocyanes	Cyanidine, acide, base	---
Alcaloïdes		Dragendorff	+++
		Mayer	+++
Anthracénates	Anthracéniques libres	NH <sub>4</sub> OH	---
	Anthracéniques combinés		
	O- Hétérosides	FeCl <sub>3</sub> et NH <sub>4</sub> OH	+++
	C- Hétérosides	FeCl <sub>3</sub> et NH <sub>4</sub> OH	+++
Saponosides			+
Oses, osides	Libres	Réactif de Rubner	+++
Acides aminés	Libres	Ninhydrine	+++

+++ : très abondant ; ++ : abondant ; + : peu abondant ; --- : absence

Cette analyse indique que les feuilles de *Stylosanthes erecta* P. Beauv sont riches en tanins et en flavonoïdes. Ces feuilles contiennent des alcaloïdes et des hétérosides (O-hétérosides et C-hétérosides) mais pauvres en saponosides. Par ailleurs cette analyse qualitative a montré que les feuilles sont riches en nutriments (oses, osides, acides aminés).

Toutefois, la recherche d'anthocyanes et d'anthracénates libres s'est révélée négative.

Ces résultats doivent être complétés par la caractérisation d'autres nutriments (acides gras, vitamines et sels minéraux notamment) et par une analyse quantitative.

### 3.4. Étude des effets du *Stylosanthes erecta* sur la fertilité des sols

Les résultats des analyses d'échantillons de sol de juillet 2007 prélevés dans les parcelles des villages de recherche (avant l'installation

de *Stylosanthes erecta*) et de juillet 2009 (3 ans après l'implantation) ont permis d'évaluer les effets sur les sols.

Le tableau VII donne les effets de la culture du *Stylosanthes erecta* sur différents sols.

Les résultats d'analyse montrent que la culture du *Stylosanthes erecta* P. Beauv améliore le taux de matière organique du sol sur toutes les parcelles des différents sites des terroirs villageois. L'amélioration de ce taux varie de 57 à 200 %.

Par contre le *Stylosanthes erecta* prélève du sol du Phosphore (P) et du Potassium (K). Ce prélèvement varie de 6 à 44 % selon les sites. Les sols qui étaient tous acides (pH inférieur à 5,5) avant l'implantation du *Stylosanthes erecta* ont été améliorés.

La parcelle du terroir villageois de Faira a été abandonnée pour des raisons de fortes dégradations.

**Tableau VII.** Effets de la culture du *Stylosanthes erecta* sur des sols des parcelles dans les terroirs villageois

	Zone de Ségou					Zone OHVN							
	Faïra	Sakoïba				Kafara				Siby			
	2007	2007	2009	Dif.	%	2007	2009	Dif.	%	2007	2009	Dif.	%
pH (eau)	4,9	4	5,4	1,4	35	4,7	6,2	1,5	32	5,3	6,1	0,8	15
Matière organique % C	0,2	0,3	0,47	0,17	57	0,3	0,71	0,41	137	0,2	0,6	0,4	200
Phosphore (P) assimilable	2	2,70	1,68	- 1,02	-38	2,70	2,55	-0,15	-6	4,9	2,75	-2,15	-44
Potassium (K) échangeable	0,2	0,24	0,16	-0,08	-33,33	0,13	0,14	0,01	8	0,2	0,13	-0,07	-35
Classe texturale	Sablo-limoneux	Limono-argilo-sableux				Limono-sableux				Limono-sableux			

Dif. = différence

Source : Laboratoire Sol-Eau-Plante (LSEP) 2007 ; 2009

## IV. Discussion

Le *Stylosanthes erecta* est une légumineuse herbacée à usages multiples présente sur plusieurs types de sols au Mali. Sa commercialisation pour des raisons diverses (médicales, boissons, fourrages etc.) impacte négativement sur la durabilité de la survie de l'espèce. Aussi, sa consommation par les animaux demeure limitée à cause de la présence de tanins insolubles surtout dans les feuilles bien que la plante soit très riche en nutriments (oses, osides, acides animés). De nombreuses études du CIPEA ont montré que les tanins insolubles forment avec les protéines des complexes tanins-protéines. Ce processus entraîne une réduction de la digestibilité de l'azote. Chez l'animal, ce phénomène se traduit par une augmentation de l'azote excrété dans les fèces et par une baisse du taux de fermentation ruminale (A. Woodward et J.D. Reed, 1989).

Le suivi du comportement du *Stylosanthes erecta* P. Beauv montre que la plante est pluriannuelle mais perd ses feuilles en saison sèche.

Les résultats d'analyse ont montré que le *Stylosanthes erecta* P. Beauv a amélioré le taux de matière organique du sol sur toutes les parcelles des différents sites des terroirs villageois. Cette amélioration du taux a varié de 57 à 200 %. Des résultats similaires ont été obtenus pour le *Stylosanthes hamata* par Sissoko, 2001; Yossi *et al.* 2001 ; Hoefsloot *et al.* 1993 ; Fomba et Bosma, 1994. Les apports de la biomasse racinaire en quantité d'azote du *Stylosanthes hamata*, ont été estimés à près de 60 kg/ha/an (Groot *et al.* 1998, Breman et Keffing, 1998).

Par contre le *Stylosanthes erecta* prélève du sol du Phosphore (P) et du Potassium (K). Ce prélèvement a varié de 6 à 44 % selon les sites (Tangara T., 2010).

## V. Conclusion

Les activités de domestication de cette plante ont porté sur : le comportement, la mise au point des techniques agronomiques de semis, d'utilisation, d'entretien et d'évaluation de ses performances dans les terroirs villageois et en station.

Le *Stylosanthes erecta* est une légumineuse herbacée à usages multiples. C'est une plante pluriannuelle, tolérante à la sécheresse et aux attaques des termites. Elle a des vertus thérapeutiques en plus de son utilisation dans l'alimentation du bétail. Comme les autres légumineuses, le *Stylosanthes erecta* P. Beauv a des effets sur la fertilité des sols.

Les résultats d'analyse de la composition chimique montrent que le *Stylosanthes erecta* cultivé en Station ou en milieu paysan est riche en Ca.

En tant que légumineuse, cette espèce contribue à améliorer la fertilité des sols autant que les autres espèces de *Stylosanthes*.

L'acquisition de semences en quantité importante reste une contrainte majeure pour la domestication de l'espèce, car les usagers du *Stylosanthes erecta* ne sont pas habitués à la récolte de semences.

## VI. Revues bibliographiques

- Boudet G., (1975. Les Pâturages tropicales et les cultures fourragères, 2<sup>e</sup> édition.
- ORSTOM, Ministère de la Coopération Française, 254 p.
- Fomba B. et Bosma R.H., 1994. Introduction des soles fourragères de *Stylosanthes hamata* dans les exploitations agricoles du Sud Mali dans : *Stylosanthes as a forage and fallow crop*. Proceedings of the Regional Workshop on the use of *Stylosanthes* in West Africa held in Kaduna, Nigeria, 26-31/10/1992. 261-269.
- Lebas F., 2004. Plantes tropicales utilisables comme fourragère pour les lapins. Article, p85.

- Sissoko H., 2001. Effet de l'association de ligneux et d'herbacée pérenne sur la remontée de la fertilité des sols et la production fourragère dans la zone soudanienne sud du Mali. Thèse de doctorat, ISFRA, Bamako.
- Yossi H., Kaya B., Sanogo M., 2001. La jachère améliorée en zone Mali-Sud. Influence sur la production fourragère et le rendement du maïs.
- Sanogo R., Diallo D., Diarra S., Ekoumou C., Bougoudogo F., 2006. Activité antibactérienne et antalgique de deux recettes traditionnelles utilisées dans le traitement des infections urinaires et la cystite au Mali. Article scientifique, Mali Médical 2006 P 18-24.
- Alexis Billes, Jean Bertrand Moundemba, Sabrina Gontier, 2001. Campagne Nyamu 1999-2000, Rapport de fin de saison.
- Cercle de Ségou, 2007, 2008. Rapports annuels, 2007, 2008.
- OHVN, 2007, 2008. Rapports annuels 2007, 2008.

# **Étude de l'impact de l'intégration agriculture-élevage sur le revenu agricole des exploitations agricoles familiales dans la zone d'encadrement de l'Office de la Haute Vallée du Niger (OHVN) : Cas de 3 villages de la Commune rurale de Ouélessébougou (Mali)**

## **Study of the impact of crop-livestock integration on farm income of farming families in the area of supervision of the Upper Niger Valley (Office de la Haute Vallée du Niger) (OHVN): Case of 3 villages of the Rural Commune of Ouélessébougou (Mali)**

Tangara T.

Institut d'Économie Rurale (IER), BP 258, Bamako Mali ; tahirou.tangara@yahoo.fr

### **Résumé**

Dans la zone d'encadrement de l'Office de la Haute Vallée Niger (OHVN), singulièrement dans la commune rurale de Ouélessébougou, les exploitations agricoles familiales pratiquent l'intégration agriculture-élevage. Aujourd'hui ces exploitations agricoles familiales font face à une baisse continue des rendements des cultures surtout céréalières due principalement à la pauvreté des sols et aux difficultés d'alimentation des animaux notamment en saison sèche. Le suivi des systèmes de culture et d'élevage et l'analyse des interactions entre ces deux systèmes dans les villages de Digan, Kafara et Sougoula ont montré la nécessité de mieux gérer ces relations. Ces mêmes analyses ont permis d'identifier trois degrés d'intégration (moyen, faible et très faible) correspondant ainsi à trois types d'exploitations agricoles familiales (A, B, C) au niveau des trois villages de recherche.

Les résultats obtenus ont montré que plus le degré est élevé, plus le revenu augmente.

Un degré faible voir très faible agit négativement et réduit la capacité de l'exploitation agricole à augmenter son revenu et sa production céréalière. En effet, les exploitations agricoles familiales qui pratiquent un degré

« moyen » d'intégration agriculture-élevage obtiennent une augmentation du revenu agricole de 10 844 FCFA par personne et par an de plus que celles qui pratiquent un degré « faible » ce qui traduit bien l'intérêt de ces pratiques. Cette augmentation a été de 18 919 FCFA entre le degré « moyen » et le degré « très faible ». Le gain de revenu par actif a été de 26 124 FCFA par an entre le type « moyen » et le type « faible » et de 28 956 FCFA par an entre le « moyen » et le « très faible ».

**Mots clés :** Intégration agriculture-élevage, exploitation agricole familiale, revenu agricole.

### **Abstract**

In the area of supervision of the *Office de la Haute Vallée du Niger* (OHVN), particularly in the rural commune of Ouélessébougou, family farms are integrating crop-livestock. Nowadays, these family farms are going through a continuous reduction of crop yields, especially of cereals, mainly due to poor soils and poor feeding of animals during the dry season. Crop-livestock systems monitoring and analysis of interactions between these two systems in the villages of Dion, Kafara and Sougoula showed the need to better manage these relationships. These same analyses have

identified three levels of integration (medium, low and very low) corresponding to three types of family farms (A, B, C) at the level of the three villages of research.

The results showed that income increases as degree get higher.

A low degree, or very low, reacts negatively and reduces the capacity of the farm to increase its income and its grain production. In fact, family farms which practice a 'medium' level of crop-livestock integration get an increase in farm income of CFAF 10 844 per person per year more than those that practice a 'low' degree which reflects the interest of these practices. This increase was 18 919 CFA francs between 'medium' and 'very low' degrees. Income generated per asset was 26 124 CFAF per year between the 'medium' and 'low' types and 28 956 CFAF per year between the 'medium' and the 'very low'.

**Key words:** Integrating crop-livestock, family farms, farm income.

## I. Introduction

Le développement économique des pays sahéliers, basé essentiellement sur l'agriculture a subi une forte stagnation par rapport à d'autres régions du monde. Les raisons d'une telle stagnation sont d'ordre endogène aussi bien qu'exogène. La situation de ces pays a été marquée par une croissance démographique rapide durant les trois dernières décennies sans que ne soit réalisée une productivité agricole correspondante. Ceci a entraîné un rythme d'exploitation élevé des ressources naturelles disponibles.

Au Mali, comme dans beaucoup de pays de la sous-région, l'augmentation de la production agricole qui a été surtout réalisée sur la base de l'extensification (augmentation des superficies cultivées) ne peut se faire aujourd'hui sans une utilisation substantielle des intrants externes.

L'économie de la zone d'encadrement de l'Office de la Haute Vallée du Niger (OHVN) est fortement dépendante de l'agriculture et de l'élevage. On constate depuis quelques décennies que les agriculteurs et agricultrices se consacrent davantage aux activités d'élevage liées à l'intensification de la production agricole. Mais la réussite de cette intégration se heurte à des obstacles importants, notamment le dilemme entre la nécessité pour les producteurs et productrices de maintenir l'élevage au sein de leur exploitation en tant que source de fumure organique, de revenus monétaires et d'assurance contre les risques en agriculture, et le désir incessant d'accroître les superficies cultivées en réponse à la mauvaise pluviométrie et à l'appauvrissement continu des sols.

## II. Matériels et Méthode

L'étude a été menée dans la zone d'encadrement de l'OHVN, singulièrement dans la commune rurale de Ouélessébougou située dans le cercle de Kati, région de Koulikoro. Ce choix se justifie par le fait que cette commune compte plusieurs villages de recherche de l'Equipe Système de Production et de Gestion des Ressources Naturelles (ESPGRN) du Centre Régional de la Recherche Agronomique (CRRA) de Sotuba, ce qui a permis de disposer d'une base importante de données biophysiques et socioéconomiques.

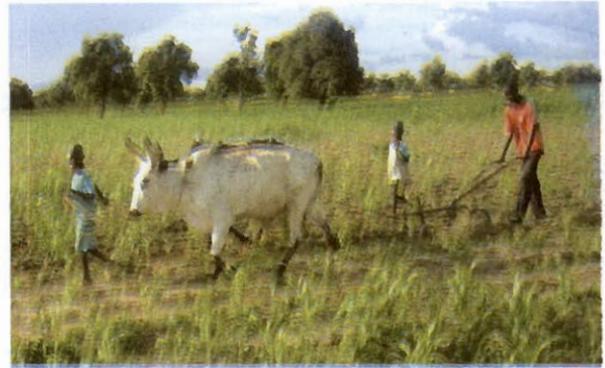
Une analyse de la diversité des situations rencontrées a conduit à un regroupement des exploitations agricoles familiales. Ce groupage par degré d'intégration ou typologie a permis de mieux caractériser les exploitations agricoles familiales et de constituer une base opérationnelle d'analyse de l'intégration agriculture-élevage. Les domaines d'intégration agriculture-élevage pratiqués par les exploitations agricoles familiales de la commune rurale de Ouélessébougou pour intensifier conjointement les deux productions afin d'améliorer leurs revenus et la sécurité alimentaire de leurs membres sont les suivants.

### - La traction animale

Elle est utilisée prioritairement en culture attelée pour la préparation du sol (labour à plat, billonnage) et pour l'entretien des cultures (sarclage, sarclo-binage).



Labour en billons grâce aux bœufs



Sarclage des champs de culture par les bœufs

### - La fumure organique

Les fèces, les fientes et les déchets des animaux et de la volaille sont utilisés sous formes brutes ou transformés pour la fertilisation des cultures afin de maximiser leurs productions.



Fabrication traditionnelle du compost



Stockage du compost sur les parcelles de culture

### - L'alimentation des animaux par les résidus de culture

Les résidus de culture et les fourrages (tiges, paille, fanes, feuilles) sont utilisés par les animaux sur place ou au sein des exploitations agricoles. Les exploitants et exploitantes stockent une partie des résidus de récolte pour les différentes espèces animales afin d'assurer l'alimentation des animaux pendant la période de la saison sèche (moment de rareté des pâturages).



Stockage traditionnel des résidus de récolte



Supplémentation des bœufs de labour

## 2.1. Élaboration des indicateurs d'intégration agriculture-élevage

Les résultats des enquêtes individuelles menées à l'échelle des exploitations agricoles familiales ont permis de calculer la part de chaque domaine d'activités dans le processus de l'intégration agriculture-élevage. Ainsi, il a été calculé par exploitation agricole pour :

- la culture attelée : les superficies totales labourées et sarclées ;
- la fumure organique : la superficie totale fertilisée ;
- les résidus de culture : la quantité de fourrage stockée.

### ▪ *Indicateur de labour*

Cet indicateur (ilab) est le résultat de la superficie labourée divisée par la superficie totale cultivée de l'exploitation agricole familiale.

**ilab = superficie labourée / superficie totale cultivée**

### ▪ *Indicateur de sarclage*

**Isar = Superficie sarclée / superficie totale cultivée**

### ▪ *Indicateur de fumure organique*

Cet indicateur (ifor) a été obtenu en divisant la superficie fertilisée avec la fumure organique au cours de la campagne agricole par la superficie totale cultivée de l'exploitation agricole familiale.

**Ifor = superficie fertilisée / superficie totale cultivée.**

### ▪ *Indicateur de résidus de culture stockés*

Il a été calculé en faisant le rapport entre la production fourragère stockée pour l'alimentation des animaux pendant la saison sèche (quantité de résidus de culture stockée : tiges, pailles, fanes) issue de toutes les cultures des champs de l'exploitation agricole familiale et la production totale de résidus de culture. Cet indicateur a été dénommé « ircs ».

**Iers = Quantité de fourrages stockée / production fourragère totale**

Pour quantifier la production fourragère totale des cultures dans les exploitations agricoles familiales, la méthode **rapport paille / grain** a été utilisée. Cette méthode a été appliquée par de nombreux auteurs pour estimer la production fourragère totale au sein des exploitations agricoles (Duivenbooden, 1992 cité par Camara, 1996 ; Dongmo, 2009 ; Coulibaly, 2010).

Les éléments utilisés pour la présente étude sont ceux appliqués par Camara, 1996 dans le cadre des travaux du Projet Sahel Soudan (PSS) dans les zones de Niono et Koutiala.

### ❖ **Indicateur composite** ou *Degré d'intégration agriculture-élevage*

Le concept intégration agriculture-élevage comprend plusieurs domaines d'échanges entre les activités de production végétale et animale. Pour mieux analyser ce concept, il a été nécessaire d'utiliser un indicateur composite. L'indicateur composite (ic) qui prend en compte les domaines d'intégration agriculture-élevage (traction animale, fumure organique, résidus de récolte) pratiqués par les exploitations agricoles des villages de Digan, Kafara et Sougoula en zone OHVN a été formulé comme suit : **ic = ilab + isar + ifor + ircs / 4**

L'indicateur composite est une grandeur exprimée sans unité qui combine différents indicateurs afin de donner une image plus large d'un phénomène.

Il mesure un concept pluridimensionnel dont un seul indicateur ne permet pas de rendre compte (ODHD/PNUD 2008). Il est compris entre 0 et 1. Plus il se rapproche de 1, plus le niveau d'intégration agriculture-élevage est élevé.

L'indicateur composite (ic) a été utilisé pour classer les exploitations agricoles familiales en groupes homogènes selon le degré de leur pratique d'intégration agriculture-élevage. En fonction des intervalles d'indicateurs, 3 groupes distincts ont été constitués. L'intervalle retenu est une progression arithmétique de raison 0,25 qui tient compte des pratiques

### Vente d'animaux

Les ventes d'animaux ont lieu tout le long de l'année au cours des foires hebdomadaires. Les principales espèces vendues par les exploitations agricoles familiales pour diverses raisons ont été les bovins (bœufs de labour reformés), les caprins, les ovins et la volaille (poulet, pintade). Ces espèces vendues ont été peu valorisées car n'ayant pas bénéficié d'une amélioration de leur état corporel, toute chose qui aurait dû maximiser le gain de vente.

Des techniques améliorées de production de viande, telles que l'embouche et le conditionnement des bœufs de labour pour un meilleur démarrage de la campagne agricole, ont été vulgarisées pendant des années mais elles demeurent peu appliquées par les paysans et paysannes. Les raisons évoquées sont, entre autres, le financement des activités. En effet, les structures de financement sont restées méfiantes après plusieurs tentatives peu concluantes. Les bénéficiaires de prêt sont peu solvables. Les ventes moyennes par espèce et par type d'exploitations agricoles sont consignées dans le tableau V.

D'une manière générale, les ventes d'animaux par les exploitations agricoles familiales sont très limitées : moins de 2 bovins et 1 petit ruminant par an pour les exploitations du type A.

### Productions moyennes de résidus de récolte par an et par type d'exploitation agricole familiale

La production en fanes, pailles et tiges a été déterminée à partir des données sur la production de grains et des rapports pailles/grains obtenus dans la littérature.

Une partie des résidus de culture de chaque année est stockée pour les animaux. Mais ces quantités demeurent encore très faibles (tableau VI).

Les quantités de résidus de culture conservées pour l'alimentation des animaux restent nettement inférieures à 20% de la production totale de fourrages produits. Elles ne permettent même pas de nourrir les bœufs de labour pendant 90 jours (période de déficit aigue des pâturages).

**Tableau V.** Ventes moyennes d'animaux sur pieds par types d'exploitations agricoles familiales par an

Désignation	Type A	Type B	Type C	Total
Nombre de bovins vendu (toutes catégories)	1,50	0,65	-	2,15
Nombre d'ovins vendu	0,11	0,21	-	0,32
Nombre de caprins vendu	0,58	0,42	0,04	1,04
Nombre de volailles vendu (toutes espèces)	1,43	0,41	1,76	3,6

**Tableau VI.** Quantités moyennes de fourrages produites et stockées par an, par type d'exploitations agricoles familiales (kg)

Types	IAE « moyen »	IAE « faible »	IAE « très faible »
Quantités de fourrages produites	17 881	14 002	5 861
Quantités de fourrages stockées	2 867	1 872	780
Pourcentage de stockage (%)	16	12	13

### 3.2. Revenus agricoles des exploitations agricoles familiales

Dans les villages de Digan, Kafara et Sougoula, l'agriculture et l'élevage sont les deux principales activités qui constituent les sources de revenus essentielles pour les exploitations agricoles familiales. Ils assurent l'autoconsommation et contribuent aux dépenses monétaires. Pour ce faire, le revenu global est essentiellement formé par les revenus des productions végétales et animales.

#### 3.2.1. Revenus des productions végétales

Le revenu annuel moyen des productions végétales a été estimé à 797 666 FCFA par exploitation agricole familiale pour le type A, 621 248 FCFA pour le type B et 240 050 FCFA pour le type C. Ces revenus constituent le résultat des efforts fournis par respectivement 11,11 et 6 actifs. Ils sont très variables à l'intérieur des types et entre les types d'exploitations agricoles familiales ( $p = 0,05$ )

#### 3.2.2. Revenus des productions animales

Le revenu annuel moyen des productions animales a été de 147 419 FCFA pour les exploitations agricoles du type A, 54 912 FCFA pour le type B et 1 053 FCFA pour le

type C. Ces revenus sont très bas à cause du système d'élevage pratiqué qui ne permet pas une exploitation judicieuse des animaux.

La source principale d'alimentation du bétail étant les pâturages qui s'appauvrissent de manière continue dès la fin de la saison des pluies. Ce qui entraîne une dégradation de l'état corporel qui ne peut plus assurer correctement des productions (lait, viande, travail etc.).

#### 3.2.3. Revenus globaux (Revenu Agricole)

Les revenus globaux annuels sont constitués des revenus agricoles et pastoraux. Ils sont des indicateurs dont l'importance permet de juger le niveau de bien-être et la capacité d'investissement des exploitations agricoles familiales. Ils assurent l'autoconsommation et contribuent aux dépenses en espèces de l'exploitation agricole. Cependant, certaines contraintes telles que la pauvreté des sols, le sous-équipement, la faiblesse pluviométrique et la rareté des pâturages pendant la saison demeurent. Aussi, toute stratégie d'amélioration du revenu passe donc nécessairement par une augmentation de la productivité et une diminution des coûts de production. Le tableau VII donne le revenu moyen annuel par type d'exploitation agricole.

Tableau VII. Revenus moyens annuels par types d'exploitations agricoles familiales (FCFA)

Type		Revenu agricole	Revenu élevage	Revenu total
A	<b>Moyenne</b>	<b>797 666</b>	<b>147 419</b>	<b>945 824</b>
	Maximum	815 473	1 080 450	3 081 000
	Minimum	190 020	4 050	201 425
	Écart-type	625 453	1 076 400	2 879 575
B	<b>Moyenne</b>	<b>621 248</b>	<b>54 912</b>	<b>676 160</b>
	Maximum	2 264 245	476 625	2 740 870
	Minimum	172 800	4 500	172 545
	Ecart-type	2 091 445	472 125	2 568 325
C	<b>Moyenne</b>	<b>240 050</b>	<b>1 053</b>	<b>241 103</b>
	Maximum	378 270	8 300	378 270
	Minimum	113 200	750	113 200
	Écart-type	265 070	7 550	265 070

L'analyse du tableau montre qu'en dépit de certaines contraintes comme la pauvreté des sols, la faiblesse de la pluviométrie et le niveau bas des prix au producteur des différents produits agricoles, les exploitations agricoles du type A ont obtenu un revenu moyen annuel de 945 824 FCFA. Celles du type B ont enregistré un revenu moyen annuel de 676 160 FCFA contre 241 103 FCFA pour le type C. Ceci explique entre autres, la capacité de travail des actifs et l'intérêt d'une pratique optimale de l'intégration des activités d'agriculture et d'élevage.

Par ailleurs, on constate que le revenu moyen annuel de l'élevage par exploitation agricole familiale a été dans l'ensemble faible. Il a été de 147 419 FCFA soit 16% du revenu global annuel de l'exploitation pour le type A, de 54 912 FCFA pour le type B soit seulement 8% du revenu global annuel de l'exploitation et de 1053 FCFA soit 0,44% pour le type C. Cette faible contribution s'explique non seulement par le bas niveau de production des animaux tropicaux, mais surtout dans le cas présent par le peu d'investissement pour les animaux. En effet, chaque type d'exploitation agricole familiale dépense (charge variable + charge fixe) en moyenne par an pour l'ensemble des animaux respectivement 12 683 FCFA pour le type A, 5 473 FCFA pour le type B et 545 FCFA

pour le type C qui possédaient un nombre très réduit de petits ruminants et/ou de volaille.

### 3.2.4. Les niveaux de revenus des exploitations agricoles familiales

Dans la zone d'étude les revenus des exploitations agricoles familiales sont essentiellement liés aux activités agricoles et d'élevage. Ils ont été de 42 992 FCFA par personne / an pour les exploitations du type A, de 33 808 FCFA / personne / an pour le type B et de 24 103 FCFA / personne / an pour le type C avec une grande variation à l'intérieur des et entre les types d'exploitations agricoles ( $p = 0,05$ ). Les revenus agricoles par actif ont été de 83 357 FCFA, 57 233 FCFA et 48 221 FCFA respectivement pour les exploitations agricoles familiales de types A, B, C. Cela montre les efforts fournis par chaque actif pour subvenir aux besoins des membres de la famille. Les différents revenus sont donnés au tableau VIII.

L'analyse du tableau montre que le revenu annuel (agriculture et élevage) qui constitue l'essentiel des ressources financières des exploitations agricoles familiales des 3 villages d'étude est très faible. Le revenu annuel / personne rapporté au nombre de jours

**Tableau VIII.** Revenus annuels moyens des exploitations agricoles familiales des villages de Digan, Kafara et Sougoula dans la commune rurale de Ouélessébougou (FCFA)

Types d'exploitations agricoles familiales	Type A	Type B	Type C
<b>Revenu moyen / exploitation</b>	<b>945 824</b>	<b>676 160</b>	<b>241 103</b>
Maximum	3 081 000	2 740 870	378 270
Minimum	201 425	172 545	113 200
<b>Revenu moyen / personne</b>	<b>42 992</b>	<b>33 808</b>	<b>24 103</b>
Maximum	98 712	74 047	48 585
Minimum	14 557	11 825	14 159
<b>Revenu moyen / actif</b>	<b>83 357</b>	<b>57 233</b>	<b>48 221</b>
Maximum	197 424	103 954	121 260
Minimum	21 635	22 575	20 535

de l'année (365) montre que les agropasteurs de ces villages vivent respectivement avec 118 FCFA pour le type A, 93 FCFA pour le Type B et 66 FCFA pour le type C par personne et par jour.

### 3.2.5. Composition du Revenu Agricole

La contribution des productions agricoles et animales dans la formation du revenu annuel sont très inégales et varient selon les pratiques. Les activités comme l'arrêt de la vente de lait pendant la saison sèche, la réforme des vieux bœufs sans amélioration de l'état physique constituent des manques à gagner au détriment des exploitations agricoles familiales. La figure 3 donne la composition du revenu annuel par exploitation agricole.

Les résultats de la figure montrent que l'élevage est demeuré une activité marginalisée par rapport à l'agriculture. En effet, les activités de productions végétales ont procuré aux exploitations agricoles familiales qui ont pratiqué un degré « moyen » d'intégration agriculture-élevage 84 % de leur revenu total. Ce pourcentage a été de 92 pour les exploitations agricoles familiales ayant pratiqué un degré « faible » et presque de 100 pour les exploitations agricoles familiales de « très faible » degré d'intégration agriculture-élevage. On constate que moins le degré

d'intégration agriculture-élevage est élevé, plus les productions végétales occupent une part importante dans la composition du revenu global des exploitations agricoles.

### 3.3. Les impacts de l'intégration agriculture-élevage

#### 3.3.1. Impact sur le revenu global

Le recours à l'intégration agriculture-élevage permet aux exploitations agricoles familiales à la fois d'alléger la charge de travail pour le labour et l'entretien des cultures en augmentant la productivité du travail, de stimuler la croissance des plants par l'apport de fumure organique et d'améliorer l'évolution pondérale des animaux et la production laitière grâce aux résidus de récolte et, en fin de compte, d'améliorer le revenu.

Les résultats obtenus ont montré que le degré d'intégration agriculture-élevage a contribué à l'amélioration du revenu des exploitations agricoles familiales (tableau IX).

Les exploitations agricoles familiales qui ont pratiqué un degré d'intégration agriculture-élevage « moyen » ont gagné 10 844 FCFA par personne et par an, donc davantage que celles qui ont pratiqué un degré « faible ». Cette augmentation du revenu a passé à

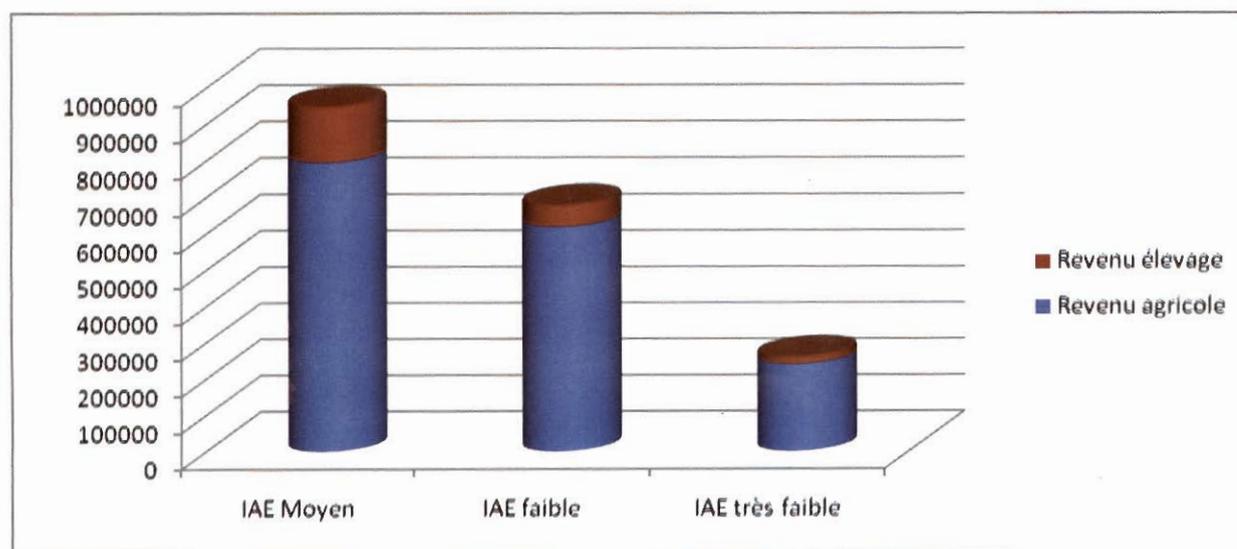


Figure 3. Composition du revenu annuel moyen par exploitation selon les types d'exploitation

18 919 FCFA de plus par personne par an par rapport à celles qui ont appliqué un degré d'intégration agriculture-élevage « très faible ». Ces différences de revenus entre les types d'exploitations agricoles familiales sont hautement significatives au seuil de  $p = 0,05$ . La même tendance à la hausse est observée pour le revenu annuel par actif selon les types

d'exploitations agricoles familiales. Ainsi les actifs des exploitations du type A ont généré par an et par actif respectivement 26 124 FCFA et 28 956 FCFA de plus que les actifs des exploitations des types B et C. Ces différences de revenus sont aussi hautement significatives au seuil de  $p = 0,05$  (tableau IX).

**Tableau IX.** Résultats d'impact de l'intégration agriculture-élevage sur le revenu global et sur la sécurité alimentaire des exploitations agricoles familiales de la zone d'étude.

Variables dépendants	(I) Degré d'intégration agriculture-élevage	(J) Degré d'intégration agriculture-élevage	Différences de moyennes (FCFA)	Signification statistique	Intervalle de confiance 95 %	
					Borne inférieure (FCFA)	Borne supérieure (FCFA)
Revenu annuel / personne	Intégration moyenne	Intégration faible	<b>10 884*</b>	0,023	946	17 399
		Intégration très faible	<b>18 919*</b>	0,000	6 286	26 367
	Intégration faible	Intégration moyenne	- 10 884*	0,023	-17399	-946
		Intégration très faible	8 035	0,431	-4642	18 951
	Intégration très faible	Intégration moyenne	-18 919*	0,000	-26 367	-6 286
		Intégration faible	-8 035	0,431	-18 951	-4 642
Revenu annuel / actif	Intégration moyenne	Intégration faible	<b>26 124*</b>	0,003	6 473	41 443
		Intégration très faible	<b>28 956*</b>	0,011	4 617	47 297
	Intégration faible	Intégration moyenne	-26 124*	0,003	-41442	-6 473
		Intégration très faible	2 947	1,000	-23 073	27 071
	Intégration très faible	Intégration moyenne	-26 124*	0,003	-47 297	-4 617
		Intégration faible	-2 949	1,000	-27 071	23 073

\*La différence des moyennes est significative au niveau de 0,0 5

### 3.3.2. Impact de l'intégration agriculture-élevage sur la sécurité alimentaire

Les céréales constituent la base de l'alimentation de la population des 3 villages d'étude. À cet effet, l'impact de l'intégration agriculture-élevage sur la sécurité alimentaire a été évalué par rapport à l'excédent céréalier par groupe d'exploitations agricoles familiales. Les résultats enregistrés montrent que les exploitations agricoles familiales qui ont un degré d'intégration agriculture-élevage « moyen » ont gagné, 40 kg de céréale par personne et par an de plus que celles qui ont un degré « faible » et, 82 kg de plus que les exploitations agricoles de degré très faible. Ces différences obtenues sont significatives au seuil de  $p = 0,05$  (tableau IX).

L'analyse du tableau montre que les exploitations agricoles familiales du type A ont enregistré une augmentation de revenu par rapport à celles de B et de C grâce au degré d'intégration agriculture-élevage qu'elles pratiquent. Ces augmentations sont significatives au seuil  $p = 0,05$ .

Le revenu annuel par personne est fortement influencé par le degré d'intégration. La pratique de l'intégration agriculture-élevage engendre des manques à gagner chez ce type d'exploitations agricoles familiales.

## IV. Discussion

Dans les villages de Digan, Kafara et Sougoula, l'agriculture et l'élevage sont les deux principales activités qui constituent les sources de revenus essentielles pour les exploitations agricoles familiales. Leur intégration a permis aux exploitations agricoles familiales de la commune rurale de Ouélessébougou d'améliorer leur revenu agricole. Ce revenu a varié de 241 103 à 945 824 FCFA respectivement pour les types C et A.

Ces valeurs sont supérieures à celles estimées par Sissoko K. et Debrah S. en 1989 dans la zone semi aride de Banamba dont la moyenne était de 227 728 FCFA / an et par exploitation agricole. Par contre elles sont inférieures à celles trouvées (1 764 886 F CFA et 594 130 F CFA) par Djouara, 2005 à l'ESPGRN/Sikasso pour des types d'exploitations agricoles classées A et C. La production cotonnière qui est très importante dans la région de Sikasso constitue un élément déterminant d'amélioration du revenu annuel des exploitations agricoles. À l'ouest du Burkina Faso, Lalba A. et col. (2002) ont enregistré des revenus agricoles annuels variant de 111 275 à 185 780 FCFA selon les différents types d'agropasteurs dans le village de Ouara. Cette tendance d'augmentation du revenu agricole avec l'association agriculture-élevage corrobore nos résultats d'étude. Par ailleurs, Dominique Bordet (1988) trouve que le revenu des exploitations en traction animale est de deux à cinq fois supérieur à celui des exploitations en culture manuelle.

Les résultats obtenus montrent que l'amélioration du revenu annuel de l'exploitation agricole familiale est fortement liée au degré de pratique de l'intégration des activités de production végétale et animale. Ainsi les trois pratiques identifiées (moyen, faible, très faible) correspondant à 3 types d'exploitations agricoles familiales dans les villages d'étude montrent que :

- le type A « moyen » a obtenu une augmentation du revenu agricole de 10 844 FCFA par personne et par an de plus que celles du type B qui pratiquent un degré « faible ». Cette augmentation a été de 18 919 FCFA entre le degré « moyen » et le degré « très faible ». Le gain de revenu par actif a été de 26 124 FCFA par an entre le type « moyen » et le type « faible » et de 28 956 FCFA par an entre le « moyen » et le « très faible ».

## V. Conclusion

La présente étude analyse l'intégration agriculture-élevage au sein de l'exploitation agricole familiale. Les résultats obtenus montrent qu'en dépit de la conjugaison de plusieurs contraintes (pauvreté des sols et des pâturages, faiblesse de la pluviométrie, sous-équipement des exploitations agricoles familiales etc.), l'intégration agriculture-élevage a un impact sur le revenu agricole des exploitations agricoles familiales.

Les analyses de régression logistique et de corrélation effectuées prouvent que le degré d'intégration agriculture-élevage a des effets sur le revenu agricole et la sécurité alimentaire des exploitations agricoles familiales.

Plus le degré est élevé, plus l'augmentation des revenus est perceptible. Un degré moins élevé réduit la capacité de l'exploitation à augmenter son revenu et sa production céréalière.

En effet, la différence d'augmentation du revenu agricole de 10 844 FCFA par personne et par an entre les exploitations agricoles qui pratiquent un degré d'intégration agriculture-élevage « moyen » et celles qui pratiquent un degré « faible » traduit bien l'intérêt de la pratique de l'intégration. Cette augmentation est de 18 919 FCFA entre le degré « moyen » et le degré « très faible ».

Malgré ces améliorations, l'intégration agriculture-élevage telle que pratiquée par les exploitations agricoles familiales dans les 3 villages de recherche, révèle d'importantes contraintes qui limitent le revenu :

- les pratiques culturales inadaptées qui se traduisent par le peu d'apport de fertilisants aux cultures, bien que les exploitants et exploitantes agricoles reconnaissent la pauvreté des sols ;
- le bas niveau d'utilisation des semences améliorées ;
- l'insuffisance de la production laitière pendant la période de la saison sèche ;
- la faible adoption des technologies d'intégration agriculture-élevage.

## VI. Bibliographie

- Camara S. O., 1996. Utilisation des résidus de récolte et de fumier dans le cercle de Koutiala : Bilan des éléments nutritifs et analyse économique. Thèse de Doctorat, Option Agroéconomie, 120 p.; Université du Mali.
- Coulibaly A., Doumbia D., Zingoré S., Huisin J., Sissoko S.M., 2010. Diagnostic préliminaire de fertilité des sols au Mali. Rapport de recherche de la campagne 2009. 16<sup>ème</sup> session de la commission scientifique.
- Djouara H., Sanogo Z.J.L. et Bengaly M., 2005. Evaluation de l'adoption des technologies agricoles introduites par la recherche et le développement dans la zone Mali-Sud ; p 1-14. In Les cahiers de l'Economie rurale.
- Dongmo L.A., 2009. Territoires, troupeaux et biomasses : Enjeux de gestion pour un usage durable des ressources au Nord-Cameroun. Thèse de Doctorat Avril 2009 275 p.; Agro Paris Tech.
- Ferraton N. et Cochet H., 2002. Démarche d'étude des systèmes de production de deux villages au nord de Man en Cote d'Ivoire. Les Editions du GRET.
- Jouve P., 1992. Le Diagnostic du milieu rural de la région à la parcelle N° 6, 40 p.
- Koné Y., 2010. Le marché du crédit face aux risques agricoles : la riziculture de l'Office du Niger  
Thèse de Doctorat : Option Agroéconomie, Mars 2010, 397 p. Université de Bamako. Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée (ISFRA).
- Alba A., Zoundi J.S. «et col. 2002». Politiques agricoles et accès aux parcours communs dans le terroir de Ouara à l'ouest du Burkina Faso : Analyse économique et environnementale à l'aide de la programmation linéaire. In Intégration agriculture-élevage : Alternative pour une gestion durable des ressources naturelles et l'amélioration de l'économie familiale en Afrique de l'Ouest et du Centre 2006.
- Nong Zhu, 2002. Déterminants de la participation aux activités non-agricoles et du revenu des ménages ruraux : le cas de la Chine. Document de travail de la série Etudes et Documents Ec 2002-23 ; 19 p. CERDI, Septembre 2002.

Observatoire du Développement Humain Durable et de Lutte Contre la Pauvreté (ODHD)/ PNUD, 2006. Profil de pauvreté du Mali 2001. Rapport National sur le Développement Humain Durable. Octobre 2006.

Observatoire du Développement Humain Durable et de Lutte Contre la Pauvreté (ODHD), 2008. Micro finance et réduction de la pauvreté au

Mali. Rapport National sur le Développement Humain Durable. Octobre 2008.

Sissoko K. et Débrah S., 1989. Evaluation des différentes sources de revenus des petits exploitants en zone semi-aride du Mali : *Etude de cas*. Commissions techniques spécialisées des productions animales. Session de juin 1989. Projet sectoriel de l'élevage.



**Institut d'Économie Rurale (IER)**

**Tél. : (223) 20 22 26 06 / 20 23 19 05**

**Fax : (223) 20 23 37 75**

**B.P. 258**

**Rue Mohamed V**

**Bamako, Mali**