



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Effets comparatifs du biochar, du phosphogypse et des résidus de baobab (*Adansonia digitata*) sur les activités microbiennes des sols salés de la cuvette rizicole Thiagar dans la Vallée du Fleuve Sénégal

Saïdou Nourou SALL^{1*}, Tégaye DIOP², Dioumacor FALL³ et Ramatoulaye NDIAYE⁴

¹Université Gaston Berger, Laboratoire des Sciences Biologiques, Agronomiques, Alimentaires et de Modélisation des Systèmes (LABAAM), BP 234, CP 32000, Saint-Louis, Sénégal.

²ISEP Richard Toll, Immeuble B. Quartier Khouma Face Sonatel Route Nationale N°2, Richard Toll, Sénégal.

³ISRA, CNRA de Bambey/ISRA, BP 53 Bambey, Sénégal.

⁴Laboratoire sols/plantes, CRA de Saint-Louis/ISRA, BP 240 Saint-Louis, Sénégal.

* Corresponding author; E-mail: saidou-nourou.sall@ugb.edu.sn ; Tel: +221 77 562 07 02.

Received: 11-10-2022

Accepted: 04-02-2023

Published: 28-02-2023

RESUME

La restauration des sols salés des cuvettes rizicoles de la Vallée du Fleuve Sénégal est un défi majeur l'autosuffisance en riz du pays. L'objectif de cette étude était d'évaluer par la méthode du Krigeage la distribution spatiale de la salinité dans la cuvette de Thiagar, zone à forte production rizicole, et de comparer le potentiel des amendements de biochar, du phosphogypse et de résidus de baobab (*Adansonia digitata*) à régénérer les activités biologiques des sols. Les cartes élaborées font apparaître une cuvette divisée en deux zones différentes selon les propriétés chimiques et biologiques des sols. Une zone qui renferme les sols avec des ESP, des activités enzymatiques FDA, des CEC et des teneurs en C les plus élevés. Et, une zone qui renferme les sols avec des CE et des pH les plus élevés et des ESP les plus faibles. Les sols étudiés ne sont pas sodiques. Les résidus de baobab, riches en N et en Ca ont induit des activités microbiennes significativement plus élevées dans les sols amendés comparés au biochar et au phosphogypse. Cette étude suggère l'orientation de la recherche vers les résidus de *Adansonia digitata* riches en calcium pour favoriser la résilience des sols les plus salés.

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés: distribution de la salinité, phosphogypse, biochar, résidus de baobab, activités biologiques, Thiagar.

Comparative effects of biochar, gypsum, and baobab (*Adansonia digitata*) residue on microbial activities in the saline soils of the Thiagar rice-growing basin in the Senegal River Valley

ABSTRACT

The restoration of saline soils in the rice-growing basins of the Senegal River Valley is a major challenge to the country's rice self-sufficiency. The aim of this study was to evaluate the spatial distribution of salinity in the Thiagar basin, an area of high rice production, using the Kriging method, and to compare the potential of biochar, phosphogypsum and baobab (*Adansonia digitata*) residues to regenerate soil biological activities. The maps developed showed two different zones according to the chemical and biological properties of the soils. The

first zone contains the soils with the highest ESP, FDA enzymatic activity, CEC and C content. The second zone contains the soils with the highest EC and pH and the lowest ESP. The soils studied are not sodic. The residues of Baobab, rich in N and Ca induced significantly higher microbial activities in the amended soils compared to biochar and gypsum. This suggests that organic residues rich in calcium such as *Adansonia digitata*, may be a promising means of alleviating the effects of salinization.

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: salinity distribution, gypsum, biochar, residues of baobab, microbial activities, Thiagar.

INTRODUCTION

La Vallée du Fleuve Sénégal est la principale zone de production du riz qui constitue en majorité l'aliment de base de la population sénégalaise. La superficie totale aménagée dans la vallée pour la riziculture avec maîtrise totale de l'eau est de 73 373 ha, sur un potentiel de 125 825 ha (SAED, 2019). Les rendements potentiels du riz irrigué dans les champs des petits producteurs de la vallée du fleuve Sénégal varient entre 4 à 6 t. ha⁻¹ (Kebbeh et Miezán 2003).

La dégradation des terres par la salinisation est l'une des plus grandes contraintes auxquelles sont confrontées les riziculteurs (Ndiaye et al., 2008) et qui conduit généralement à l'abandon des périmètres rizicoles après plusieurs années de culture. Ndiaye (2009) a montré que l'extension des sols salins à sodiques augmentent de plus en plus dans les zones irriguées. L'auteur a montré par la cartographie, que les sols salés-sodiques qui représentaient 63% de la superficie du delta en 2001 sont passés à 43% en 2003 et les sols sodiques de 6% à 19%. Cette cartographie a été effectuée à l'échelle du Delta du Fleuve Sénégal sur une surface estimée à 3240 km² et selon une méthode dite déterministe (Stein, 1999) où l'interpolation s'effectue sans une précision des occurrences d'incertitudes d'estimation. Il est nécessaire d'avoir une estimation de cette salinité à une échelle locale plus précise telle que la cuvette de Thiagar afin de mobiliser des données pour améliorer les aménagements de cette zone à forte production rizicole. De plus en plus, sous l'influence anthropique, les sols de cette partie du Delta peuvent présenter une dynamique différente sous l'impact des aménagements hydro-agricoles existants ou non et de la mise en

culture, en particulier des pratiques agricoles utilisées depuis quelques années (double culture de riz et fertilisation essentiellement minérale).

Le krigeage présente l'avantage de prendre en compte les distances entre les données (i.e. les points de mesure), les distances entre les données et la cible (i.e. le point pour lequel on veut estimer la mesure) et la structure spatiale (grâce à l'analyse variographique). A l'échelle du village de Thiagar, le krigeage pourrait être une meilleure méthode d'interpolation géostatistique et un excellent outil d'analyse de tendances de distribution de la salinité (Arnaud et Emery, 2000).

Par ailleurs, les quantités excessives de sel dans les sols impactent sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques. Tejada et Gonzalez (2006) ont montré que l'augmentation de la conductivité électrique dans le sol diminue la stabilité structurale et la densité apparente. Une forte quantité de sodium (Na⁺) échangeable et un pH élevé entraînent un gonflement et une dispersion des argiles et des agrégats. Cela conduit à une baisse de la perméabilité du sol et une faible disponibilité de l'eau.

L'effet de la salinité sur l'activité microbienne dans les sols a fait l'objet de nombreuses études avec des résultats variables. Certaines études ont montré que l'activité biologique du sol diminuait avec l'augmentation de la CE du sol (Sall et al., 2015 ; Fall et al., 2018). Cependant, Rietz et Haynes (2003) ont constaté que l'activité respiratoire du sol n'était pas corrélée de manière significative avec la CE.

Pour contrôler la salinité et la sodicité dans les sols agricoles, une grande attention est

accordée aux approches permettant de maintenir une agriculture durable. Parmi elles, il y'a l'utilisation du phosphogypse ou calcite (CaCO_3) pour améliorer les sols salins / sodiques (Qadir et al., 2001). Le biochar, matériel organique poreux obtenu par pyrolyse de la biomasse végétale, est aussi utilisé pour les sols affectés par le sel (Lashari et al., 2013 ; Diatta et al., 2019). L'apport de matière organique est également une pratique importante pour régénérer les sols et améliorer leur fertilité. En effet, dans nos études précédentes, nous avons montré que l'amendement organique permet d'améliorer la capacité du sol à résister au stress salin (Sall et al., 2015) à travers une stimulation de l'activité biologique. D'autres auteurs ont montré que l'ajout de résidus organiques permet de réduire le pourcentage de sodium échangeable (ESP) et la conductivité électrique (CE) et d'augmenter la capacité de rétention d'eau et la stabilité globale (Qadir et al., 2001 ; Fall, 2017).

Il ressort de la littérature que le phosphogypse est très efficace pour les sols salés et sodiques en association avec la matière organique (Muhammad et Khattak, 2011 ; Yacouba et al., 2018 ; Diop et al., 2019). Dès lors, les résidus de matière organique riches en calcium seraient fortement appréciés pour régénérer les sols salins et sodiques. Le baobab, *Adansonia digitata* est très présent dans les régions du Sénégal et dans la plupart des régions subhumides à semi-arides du sud du Sahara. Les feuilles et les écorces sont riches en composés nutritifs (glucides, protéines, polyphénols, vitamines...), et en éléments minéraux dont le calcium, le fer, le zinc, le potassium, et le phosphore (Chadare et al., 2009). Son utilisation pourrait constituer une source cumulée de calcium et de composés organiques pour les sols salins et sodiques.

Il est nécessaire d'étudier ses effets dans la cuvette de Thiagar afin de mobiliser des données pour améliorer les aménagements de cette zone à forte production rizicole. Les objectifs de cette étude ont été de (i) déterminer par Krigeage la distribution spatiale de la salinité dans la cuvette (ii) et d'évaluer les conséquences de l'amendement avec du biochar, du phosphogypse et de résidus de

Adansonia digitata sur les activités biologiques (respiratoire et enzymatique).

MATERIELS ET METHODES

Sites

La zone de l'étude, Thiagar, un village qui se situe dans la commune rurale de Ronkh (arrondissement de Ndiaye) située dans le delta du fleuve Sénégal, à 90 km de Saint-Louis et à 60 km de Dagana, chef-lieu de Département (Figure 1). Le village Thiagar est situé à l'extrême Nord du Sénégal à 5 km de la commune de Rosso et à 100 km de la ville de Saint-Louis. Elle est de taille assez moyenne et sa proximité avec le fleuve Sénégal lui confère d'énormes potentialités agricoles. Elle est localisée dans le Haut delta du fleuve Sénégal avec comme limites le fleuve Sénégal au Nord, la localité de Rosso Sénégal à l'Est, le village de Ndiatène, à l'Ouest, et la grande cuvette de Thiagar au sud.

Le village Thiagar est compris entre les isohyètes 300 et 400 mm avec un climat de type sahélo-saharien et caractérisé par l'alternance de deux saisons contrastées : une saison pluvieuse de courte durée (juillet à août) et une saison sèche qui couvre le reste de l'année. Les vents continentaux violents et chauds en saison sèche sont appelés harmattan. Leur vitesse maximale est de 50 km/h, ils sont très érosifs. La température moyenne est de 28°C avec des maxima mensuels de 40°C (de mars à avril) et les minima 16°C (janvier-février).

Les sols sont de type *Hollaldés* (75% d'argile, structure prismatique), *faux Hollaldés* (argilo-limoneux avec 30 à 50% d'argile, sans structure déterminée), fondé (limoneux, avec 10 à 30% d'argile, structure cuboïde) et sableux (argile inférieure à 10%).

La végétation est dominée par une savane arbustive qui est essentiellement composée des espèces *Acacia raddiana*, *Balanites aegyptiaca*, *Calotropis procera*, *Sporobolus helvolus*, *Tamarix senegalensis*, *Oryz abarthii*, *Acacia nilotica*, *Combretum micranthum* et *Avicennia africana*.

Échantillonnage des sols

La zone a été divisée en une vingtaine de parcelles (maillage) en respectant les critères d'homogénéité, et dans chacune des parcelles, au moins 5 échantillons ont été prélevés pour faire un mélange. Un point d'échantillonnage dans cette étude est un mélange composite constitué jusqu'à 10 prélèvements à la tarière (horizon 0-20 cm) pour les parcelles de 1 ha et plus. Au total, il y'a eu 20 points d'échantillonnage. Tous les points de sondage sont localisés par GPS et utilisés pour effectuer le krigeage.

Les échantillons de sol ont été séchés à l'air libre à température ambiante, tamisés à 2 mm et soigneusement conservés jusqu'à leur analyse.

Analyse des sols

La mesure du pH a été réalisée selon la méthode de Black et Evan (1965) et celle de la conductivité électrique (CE) a été réalisée selon la méthode de Bonfils (1967) à partir de mélange saturé de sol et d'eau distillée, à 25°C.

Le carbone total a été déterminé par la méthode d'Anne (1945) et l'azote organique par la méthode de Kjeldahl après combustion (Bremner, 1996).

Les Cations Échangeables ont été extraits par une solution d'acétate d'ammonium 1M à pH 7 dosés au Spectrophotomètre de flamme en absorption atomique. La détermination de la capacité d'échanges cationiques (CEC) à pH 7 s'est faite à base de solution d'acétate d'ammonium. L'ammonium fixé a été dosé par colorimétrie selon la méthode décrite par Searle (1984).

Le sodium échangeable (Na^+) et la capacité d'échange cationique (CEC) ont permis de calculer le pourcentage de sodium échangeable (ESP) qui est le degré de saturation en sodium du complexe absorbant.

Le potentiel de respiration du sol a été déterminé en incubant le sol, humidifié à 100% de sa capacité de rétention dans un flacon à 28°C pendant 7 jours. Le CO_2 libéré a été absorbé dans une solution de NaOH 1N et déterminé par titration en retour avec HCl. Après 7 jours, le sol a été utilisé pour

déterminer l'activité de la Fluorescéine Di-acétate par la méthode de Adam et Ducan (2001).

Incubation des sols avec les amendements

Les cuvettes sont différenciées par les caractéristiques des sols. Ainsi, les analyses ont permis de séparer les échantillons de sol en 2 groupes. S1 : groupe des échantillons à fort ESP (P1 à P10) ; S2 : groupe des échantillons à fort CE (P11 à 20).

Pour tester l'effet des amendements sur les sols, les échantillons les plus caractéristiques ont été choisis dans chaque groupe :

- S1 : P1-10 : l'échantillon P6 avec son ESP le plus élevé : 14.696.
- S2 : P11-20 : l'échantillon P17 avec le CE le plus élevé : 14500 ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Les incubations de ces sols ont été menées au laboratoire dans un dispositif complètement randomisé en conditions contrôlées durant 2 mois en utilisant des bocaux de 0,5 L contenant chacun 30 g sol. Quatre types d'amendements (Phosphogypse, résidus de baobab, biochar et engrais minéral) ont été utilisés. Pour chaque amendement 3 répétitions ont été utilisées.

Le phosphogypse (P-Gypse) a été apporté à la dose équivalente de 1 t/ha (soit 0,08 g par bocal). Le biochar, fabriqué avec un pyrolyseur de type Pyro-6 à partir de balle de riz et de *Typha australis*, a été apporté à 10 t/ha. Les écorces de baobab (*Adansonia digitata*, ou résidus de baobab) séchées ont été apportées à 10 t/ha. L'engrais (PP) est un mélange d'urée (46% de N) et de NPK (15-15-15) a été apporté selon les recommandations de la culture de riz conventionnelles pour les agriculteurs (équivalent à 200 kg/ha d'urée et 150 kg/ha de NPK).

Dans chaque bocal, un flacon de soude a été placé pour absorber le CO_2 émis et mesurer le potentiel de minéralisation du C durant deux (2) mois d'incubation. Le piège à CO_2 (NaOH 1N) est récupéré toutes les semaines et remplacé par un nouveau. Et, le dosage en retour par titration avec HCl est effectué. A la fin de l'incubation, l'activité de la Fluorescéine Di-acétate a été déterminée

dans chaque traitement par la méthode de Adam et Ducan (2001).

Les analyses chimiques et biochimiques des écorces de baobab ont été réalisées au Laboratoire de chimie LNRV-ISRA. (Matière minérale : 20,7%, Soluble : 41,9% ; Hémicellulose : 4,3% ; Cellulose : 19,7% ; Lignine : 13,1% ; Calcium : 3,6% ; Phosphore total : 0,26% ; Azote total : 2,9%). Les analyses physico-chimiques des sols ont été réalisées au laboratoire du Centre Régional Agronomique (CRA) de l'ISRA. Les analyses biologiques au laboratoire des sciences biologiques, agronomiques, alimentaires et de modélisation des systèmes complexes (LABAAM) de l'UGB.

Traitements statistiques

Le Krigeage a été utilisé pour l'interpolation de la géostatistique. Il repose sur le principe de proximité de la variable

régionalisée (Arnaud et Emery, 2000), le pH, la CE, et l'ESP. La valeur de la variable régionalisée, connue uniquement sur les sites échantillonnés, est interpolée par krigeage dans les sites dont on ne dispose pas des données d'observation. L'interpolation tient compte de la dépendance de la structure spatiale des observations analysées à l'aide d'un variogramme. Le krigeage paramétré sous le logiciel Arc Gis a été la méthode d'interpolation appliquée.

Une analyse de variance (ANOVA) avec le logiciel XLSTAT version 2016.05.34217 a été effectuée. La normalité de la distribution des variables mesurées a été au préalable confirmée et le test de Fischer (LSD) a été utilisé avec un degré de probabilité $P < 0,05$.

Une Analyse en Composante Principale (ACP) a été réalisée avec le même logiciel pour classer les sites selon les variables mesurées.

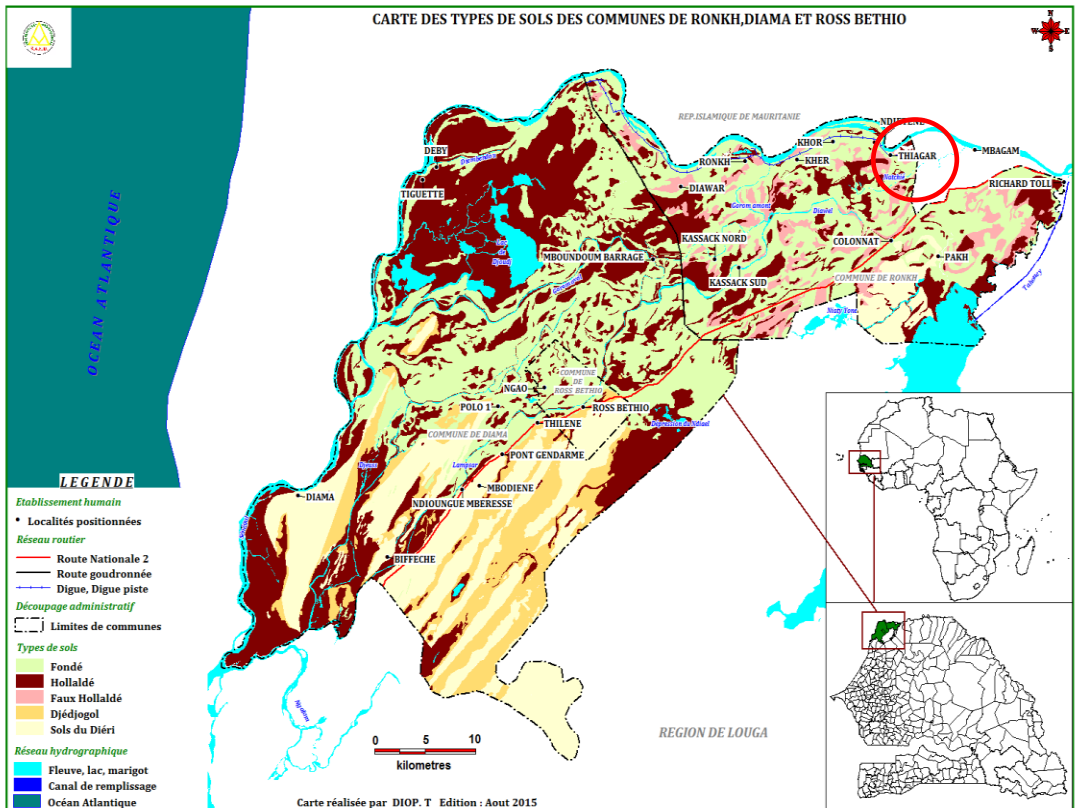


Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude.

RESULTATS

Évaluation de la salinisation

Dans la zone d'étude, la CE varie de 1,43 à 14,50 dS/cm et l'ESP varie de 1,30 à 14,70. La cuvette présente des sols légèrement salés à très salés. Cependant, ces sols ne sont pas sodiques. Le krigeage a permis de séparer la zone en deux parties (Figure 2A).

Une grande surface de cette cuvette au nord contient les sols les plus salés (CE varie de 6,50 à 14,50 dS/cm). Ces sols sont associés à des ESP les plus faibles. Une partie au sud de la cuvette contient les sols avec les ESP les plus élevés (2,65 à 14,70) et qui présente les CE les plus faibles. Les sols les plus acides sont dans la zone nord qui présente en majorité des CE faibles (Figure 2B).

Les deux axes du plan factoriel F1 et F2 représentent 54% de l'inertie totale (Figure 3). L'axe F1 qui représente 37,1% de la variance, oppose les échantillons de P1 à P8, marqués par un fort ESP et une activité de la FDA plus élevée, aux autres échantillons de P11 à P20, marqués par des conductivités CE et des pH les plus élevés. L'axe F2 qui représente 16,9% de la variance, oppose l'échantillon P9 à l'échantillon de sol P10, marqué par un CEC et une teneur en C les plus élevés.

L'ACP fait apparaître une corrélation significative positive ($p < 0,05$) entre le pH et la CE ($r = 0,52$), entre ESP et Na ($r = 0,88$). L'activité enzymatique FDA est plus élevée dans les sols les plus riches en C et les plus élevés en CEC (P1 à P10). Les corrélations sont

significatives et positives ($r = 0,44$). Une corrélation négative apparaît entre CE et ESP ($r = - 0,56$), entre CE et Na ($r = - 0,6$), entre CE et FDA ($r = - 0,58$), entre ESP et FDA ($r = 0,4$). Aucune corrélation n'a été trouvée entre le potentiel de minéralisation MinC-CO₂ et la CE et l'ESP.

Effet de l'amendement sur l'activité biologique du sol

Les activités de la FDA et le potentiel de minéralisation du C présentent un profil similaire entre les différents sites. Comparé au sol non amendé, les activités de la FDA sont significativement plus élevées dans sols amendés avec les résidus de baobab et le biochar (Tableau 1). Les activités de la FDA sont significativement plus faibles dans les sols témoins, les pratiques paysannes et les sols amendés avec le phosphogypse. Il en est de même pour le potentiel de minéralisation du C, avec une quantité totale de C-CO₂ émis significativement plus élevée dans les sols amendés avec le résidu de baobab. Les résultats présentent un effet sites, un effet traitement et des interactions site*traitements hautement significatifs (Tableau 1).

Lorsque les sols sont amendés avec les résidus de baobab, les activités microbiennes, en particulier la FDA sont significativement plus élevées dans les sols du site S2 marqué par des conductivités CE et des pH les plus élevés et des ESP les plus faibles.

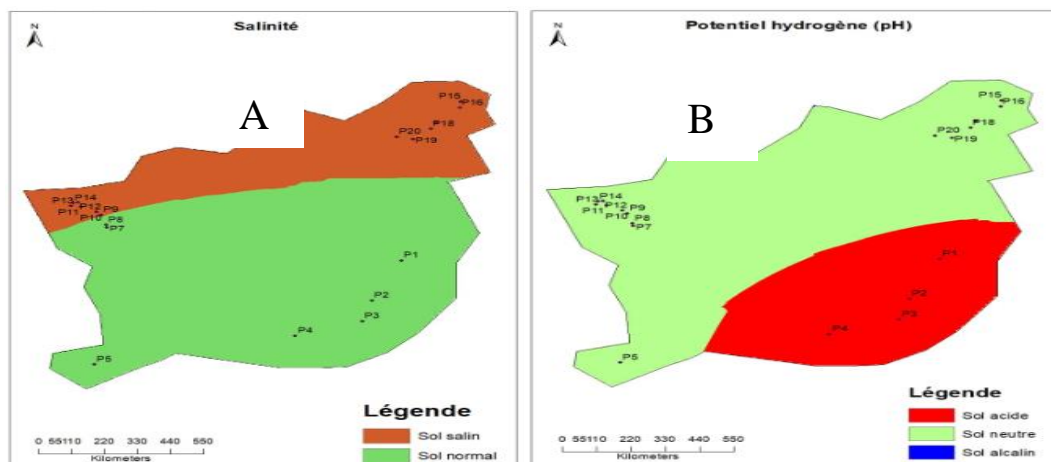


Figure 2: Les cartes de salinité (A) et du pH (B) de la cuvette par la méthode du krigeage. P1 à P20 sont les points de prélèvement.

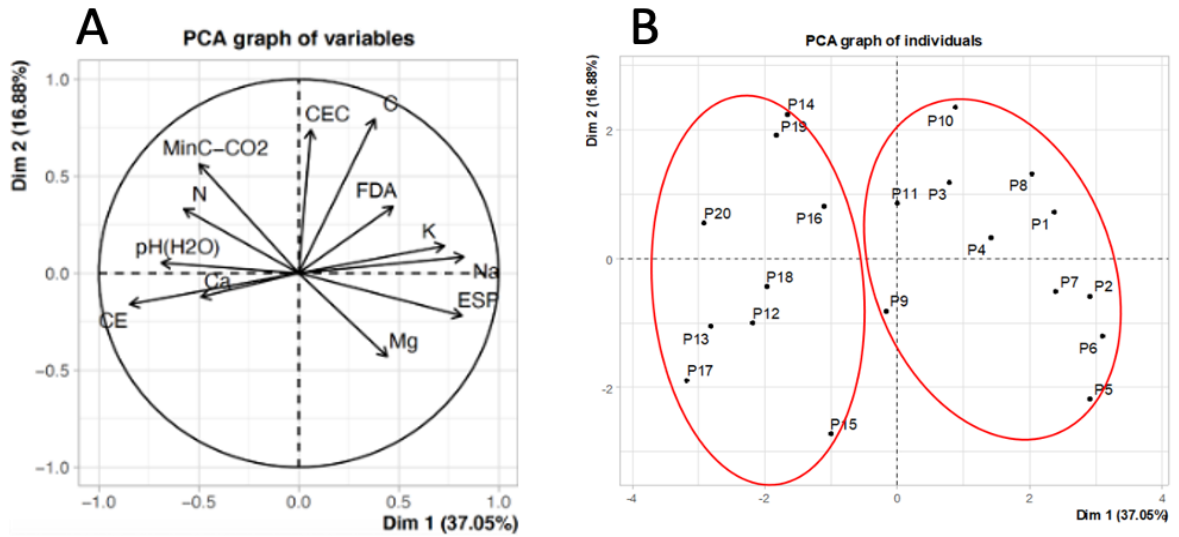


Figure 3: Analyse en Composante Principale des sols (A : cercle de corrélation entre les variables ; et B : répartition des échantillons de sol).

Tableau 1: Quantité totale de C-CO₂ minéralisé et activité FDA après 2 mois d’incubation des échantillons issus des sites S1 (échantillon de Thiagar, P6) et S2 (échantillon de Thiagar, P17).

	*FDA		C-minéralisation	
	mg Fluorocein kg-1 sol h-1		mg C-CO2 kg-1 sol	
ST	4,68 ± 0,67 c		17,6 ± 8,80 b	
PP	8,23 ± 1,43 bc		49,87 ± 5,08 b	
S1	Biochar		13,55 ± 4,62 b	
	P-Gypse		6,31 ± 3,89 c	
	Res-Baobab		30,05 ± 3,35 a	
	ST		1,91 ± 1,77 c	
	PP		5,09 ± 2,38 bc	
S2	Biochar		8,76 ± 3,73 b	
	P-Gypse		8,64 ± 2,63 b	
	Res-Baobab		42,21 ± 2,27 a	
Site	0,01		0,014	
Traitement	< 0,0001		< 0,0001	
Site*Traitement	< 0,0001		0,004	

Avec FDA : activité Fluorocein Di-Acetate ; C-minéralisation : potentiel de minéralisation du C ; ST : Sol Témoin ; PP : Pratique Paysanne. Pour un même site et pour une même colonne, les valeurs portant des lettres différentes indiquent une différence significative au seuil de 5 % selon le test de Fisher

DISCUSSION

Évaluation de la salinisation

Dans la littérature, les sols sont considérés comme salins lorsqu'ils ont une CE égale ou supérieure à 4 dS m⁻¹ et sodiques lorsqu'ils ont un ESP supérieur à 15 (Sumner, 1995). Les sols étudiés ne présentent pas de sodicité. Dans une autre étude, Diop et al. (2019) avaient trouvé que les sols de la cuvette de Thiagar sont sodiques. Pour ces auteurs, cette sodisation était due à la pratique intensive de l'irrigation sans drainage qui entraîne une augmentation de la concentration en sel des sols. Par ailleurs, les cartes de distribution de la salinité dans la cuvette extrapolée par la méthode du krigeage sont différentes d'une étude à une autre. Cette contradiction s'explique d'abord par une différence au niveau des zones de prélèvement, et donc également des cartes élaborées. Mais, aussi, elle soulève la nécessité d'avoir un nombre de points de prélèvement assez élevé pour effectuer une interpolation géostatistique par le krigeage à l'échelle de toute la cuvette.

Une CE élevée dans les sols P11 à P20 a été obtenue malgré une faible teneur relative en ESP et Na. Cela pourrait être expliqué, par l'accumulation des autres ions K⁺ et Mg²⁺ (Flavel et Murphy, 2006). Cette accumulation est expliquée par une solubilisation plus accrue aux pH relativement élevés de ces sols. Ce résultat est corroboré par la corrélation positive entre CE et pH et la corrélation négative entre CE et ESP. Cette dernière a été également montrée par Diop (2017) dans une autre zone la cuvette de Thiagar.

Globalement, les enzymes du sol sont très sensibles aux modes de gestion des sols et peuvent servir d'indicateurs fiables pour les activités biologiques des sols salins et/ou sodiques (Singh, 2015). Des auteurs ont montré que la salinité réduit la respiration du sol, l'activité enzymatique et la biomasse microbienne du sol (Tripathi et al., 2006 ; Rousk et al., 2011). Les sols les plus salins présentent des activités enzymatiques les plus faibles (Sall et al., 2015). Ce qui explique que nous avons trouvé une corrélation négative entre CE et FDA. Cependant, pour la respiration du sol, aucune corrélation n'a été

trouvée entre le potentiel MinC et CE. Rietz et Haynes (2003) n'ont également pas obtenu de corrélation significative.

Les échantillons P1 à P10, avec des CE les plus faibles présentent des activités FDA et des ESP élevés avec une corrélation significative. Ce résultat a été également démontré par Mavi et al. (2010) pour qui la sodicité n'augmente l'activité microbienne que pour de faible CE. Cette augmentation de l'activité microbienne du sol pour une forte sodicité et une faible salinité a été également soulevée par d'autres auteurs et serait due à la solubilisation de la matière organique du sol et la disponibilité de substrat additionnel pour les microorganismes (Chen et al., 2019).

L'absence d'effet d'un ESP élevé sur la respiration dans la présente étude peut être expliquée par la concentration élevée d'électrolytes (Na, Mg, K) qui bloque les groupes fonctionnels de la matière organique et crée des polymères plus stables avec les argiles, non accessibles à la décomposition (Lehmann et al., 2006).

Effet des amendements sur la salinité et l'activité du sol

Parmi les amendements utilisés dans cette étude, le phosphogypse est connu depuis longtemps comme un puissant agent de régénération des sols sodiques (Koralegedara et al., 2019). Cet amendement fournit suffisamment de Ca²⁺ qui déplace l'excès de sodium (Na⁺) sur le complexe d'échange cationique du sol (Qadir et al., 2001). Un drainage permet ensuite une élimination du Na⁺. Les sols de la zone d'étude ne sont pas sodiques, donc les teneurs en Na⁺ ne sont pas significativement élevées pour engendrer une différence significative après un ajout de gypse comparé aux sols non amendés et la pratique paysanne.

Par contre, le biochar, produit à partir de diverses sources de matières organiques avec différentes méthodes de carbonisation peut avoir des effets variables sur les processus du sol (Beusch, 2021). Une stimulation de l'activité enzymatique de la FDA a été obtenue après ajout du biochar. Un résultat qui a été

également montré par Lasota et al. (2021). Cependant, le biochar, très récalcitrant à la décomposition microbienne (Lehmann et al., 2011) en raison de sa composition chimique aromatique, ne présente pas d'effet significatif sur le potentiel de Min-C comparé aux sols non amendés, à la pratique paysanne et au phosphogypse. La fraction récalcitrante est supposée être un habitat préféré pour les microorganismes et peut supporter une communauté microbienne plus active (Pietikainen et al., 2000) avec une respiration basale faible et un potentiel de croissance élevé.

L'activité enzymatique et la minéralisation de carbone les plus élevées ont été observées dans les sols amendés par les résidus de Baobab. Ce qui peut être attribué d'une part, à la biodégradabilité plus élevée du résidu de baobab et une stimulation de l'activité microbienne par une disponibilité d'éléments nutritifs (Sall et al., 2003). Les analyses chimiques du Baobab donnent des teneurs élevées en N et P (respectivement 2,9% et 0,26%). Les résidus de Baobab utilisés sont par ailleurs, un réservoir important de calcium (3,6%). Le calcium a été apporté en grande quantité au même niveau que celui du gypse par l'application du Baobab. Il apparaît que le Baobab à un effet cumulatif de calcium (Ca^{2+}) pour remplacer l'excès de sodium (Na^{+}) des sites d'échange cationique et de composés organiques au même titre de l'apport du Gypse et de la matière organisée préconisés par d'autres auteurs (Muhammad et Khattak, 2011 ; Diop et al., 2019). La conduite d'une expérimentation avec un dispositif de lixiviation pourrait permettre de suivre le degré de résilience du sol en présence du riz.

Conclusion

La restauration des sols salés de la Vallée du Fleuve Sénégal et en particulier dans les aménagements de la zone de Thiagar, zone présentant une décroissance dans la production rizicole, est un défi majeur pour accompagner l'autosuffisance en riz du pays. Au-delà des méthodes physiques très coûteuses pour un petit producteur, des procédures efficaces

basées sur l'élimination du sodium échangeable et soluble et la modification de la composition ionique des sols par l'ajout de matière organique, parallèlement à la lixiviation des sels de sodium sont proposées. Les résultats de cette étude mettent en exergue un résidu végétal, le Baobab (*Adansonia digitata*) qui combine un apport élevé de calcium Ca^{+} et de composés organiques capables de régénérer l'activité biologique des sols salés. Les résidus de baobab constituent ainsi, un modèle de résidus qui favorise la résilience des sols les plus salés. Des recherches sur le terrain sont nécessaires pour déterminer si cette capacité à régénérer l'activité biologique des sols salés en utilisant des amendements organiques de *Adansonia digitata* peut aider les cultures à résister au stress de la salinité.

CONFLIT D'INTERETS

Les auteurs n'ont pas de conflit d'intérêts lié à cet article.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

SNS a coordonné le projet, supervisé l'expérimentation et les analyses et a conduit la rédaction scientifique. TD a contribué à la mise en œuvre du projet, au prélèvement des échantillons de sol et élaboré les cartes par Krigeage. RN a participé à la mise en œuvre du projet et a supervisé les analyses physico-chimiques. DF a contribué à la recherche bibliographique et à la rédaction scientifique de l'article.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient en post-mortem le Pr Mateugue DIACK coordonnateur du Projet PERIPERI-U. Les auteurs remercient les 2 relecteurs anonymes qui ont apporté des corrections et des suggestions de correction dans le manuscrit.

Ce travail a été possible grâce au soutien financier du projet PERIPERI-U sous le thème "Gestion des risques naturels et de la vulnérabilité pour une sécurité alimentaire dans la vallée du fleuve Sénégal", financé par l'USAID.

La finalisation a été accompagnée à travers le projet ACSA (Sécurité Alimentaire et Adaptation au Changement Climatique dans les Systèmes Agricoles des petits Producteurs du Delta du Fleuve) (Ref. G03701) par le financement de la fondation OSIWA (Open Society Initiative for West Africa)

RÉFÉRENCES

- Adam G, Duncan H. 2001. Development of a Sensitive and Rapid Method for the measurement of total Microbial Activity using Fluorescein Diacetate (FDA) in a Range of Soils. *Soil Biol. Biochem.*, **33**: 943-951. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00244-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00244-3)
- Anne P. 1945. Sur le Dosage Rapide du Carbone Organique des sols. *Ann. Agron.*, **2**(1): 161-172.
- Arnaud M, Emery X. 2000. Estimation et Interpolation Spatiale. *Hermes Science Publications*, Paris (France), 221 pages.
- Beusch C. 2021. Biochar as a Soil Ameliorant: How Biochar Properties Benefit Soil Fertility—A Review *Journal of Geoscience and Environment Protection* **9**(10): 28-46. DOI: [10.4236/gep.2021.910003](https://doi.org/10.4236/gep.2021.910003).
- Black CA, Evan DD. 1965. Methods of Soil Analysis. *Am. Soc. of Agron.*, **9**: 917- 918.
- Bonfils P. 1967. Méthodes d'analyses des sols. *Service d'étude des sols*, n° 91, p. 156.
- Bremner JM. 1996. Nitrogen-total. In *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods Part 3*, Sparks, D.K. (ed). *American Society of Agronomy*, Madison: Wisconsin; 1085–1122.
- Chadare FJ, Linnemann AR, Hounhouigan JD, Nout MJR, Van Boekel M. A. J. S. 2009. Baobab Food Products: A Review on their Composition and Nutritional Value. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **49**:254–274. DOI: [10.1080/10408390701856330](https://doi.org/10.1080/10408390701856330)
- Chen L, Li C, Feng Q, Wei Y, Zhao Y, Zhu M, Deo RC. 2019. Direct and Indirect Impacts of Ionic Components of Saline water on Irrigated Soil Chemical and Microbial Processes. *Catena*, **172**: 581-589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.030>
- Diatta Y, Diedhiou S, Goudiaby AOK, Sagna YP, Diallo MD, Ndoye I. 2019. Effet des Amendements Organiques sur la Tolérance à la Salinité du Riz (*Oryza sativa* L) dans les Bas-Fonds en Zone Sud-Soudanienne au Sénégal. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **13**: 2691-2703. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v13i6.21>
- Diop T. 2017. Dégradation des Terres Agricoles en Milieu Sahélien: Cartographie et Techniques de Récupération des sols Salés des Périmètres Rizicoles du Delta du Fleuve Sénégal. Thèse de Doctorat, Département Géographie, Université Gaston Berger de Saint-Louis, Sénégal, p. 201.
- Diop T, Ndiaye R, Sow SA, Bâ DD. 2019. Analyse des effets du Phosphogypse et du Fumier sur la Salinité de la Cuvette de Ndiol dans le Delta du Fleuve Sénégal. *Afrique SCIENCE*, **15**: 71 – 80. URL: <http://www.afriquescience.net>.
- Fall ACAL. 2017. Sustainable Management of Coastal Saline soils in the Saloum river Basin, Senegal. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **11**: 1903-1919. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v11i4.39>
- Fall D, Bakhom N, Fall F, Diouf F, Faye MN, Ndiaye C, Hoher V, Diouf D. 2018. Effect of Peanut Shells Amendment on soil properties and Growth of Seedlings of *Senegalia senegal* (L.) Britton, *Vachellia seyal* (Delile) P. Hurter and *Prosopis juliflora* (Swartz) DC in salt-affected soils. *Annals of Forest Science*, **75**: 32. DOI: [10.1007/s13595-018-0714-x](https://doi.org/10.1007/s13595-018-0714-x).
- Flavel TC, Murphy DV. 2006. Carbon and Nitrogen Mineralization rates after application of Organic Amendments to

- soil. *J. Environ. Qual.*, **35**: 183–193. DOI: 10.2134/jeq2005.0022
- Kebbe M, Miezán K. 2003. Ex-ante Evaluation on Integrated Crop Management options for Irrigated Rice Production in the Senegal River Valley. *Field Crop Res.*, **81**: 87–94. DOI: 10.1016/S0378-4290(02)00197-1
- Koralegedara NH, Pinto PX, Dionysiou DD, Al-Abed SR. 2019. Recent advances in Flue Gas Desulfurization Gypsum processes and applications: A review. *J. of Environ. Manag.*, **251**: 109572. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109572
- Lashari MS, Liu Y, Li L, Pan W, Fu J, Pan G, et al., 2013. Effects of Amendment of Biochar-Manure Compost in Conjunction with Pyrolytic solution on soil quality and Wheat Yield of a Salt-Stressed Cropland from Central China Great Plain. *Field Crops Res.*, **144**: 113–118. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.11.015
- Lasota J, Błońska E, Babiak T, Piaszczyk W, Stępniewska H, Jankowiak R, Boroń P, Lenart-boroń A. 2021. Effect of Charcoal on the Properties, Enzyme Activities and Microbial Diversity of Temperate Pine Forest Soils. *Forests*, **12**(11): 1488. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12111488>
- Lehmann J, Kinyangi J, Solomon D. 2006. Organic Matter Stabilization in soil Microaggregates: Implications from Spatial Heterogeneity of Organic Carbon Contents and Carbon Forms. *Biogeochemistry Volume*, **85**: 45–57. DOI: 10.1007/s10533-007-9105-3
- Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D. 2011. Biochar Effects on Soil Biota – A review. *Soil Biol. Biochem.*, **43**: 1812–1836. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.04.022
- Mavi MS, Marschner P, Chittleborough DJ, Cox JW. 2010. Microbial Activity and Dissolved Organic Matter Dynamics in the soils are affected by Salinity and Sodicity. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1–6 August 2010, Brisbane, Australia.
- Muhammad D, Khattak RA. 2011. Wheat yield and Chemical Composition as Influenced by integrated use of Gypsum, Pressmud and FYM in Saline-Sodic soil, *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, **33**(1): 82-89. DOI: <https://jcsp.org.pk/ArticleUpload/947-4272-1-PB.pdf>
- Ndiaye B, Molénat J, Ndoye S, Boivin P, Cheverry C, Gascuel-Oudou C. 2008. Modélisation du Transfert de l'Eau et des Sels dans les Casiers Rizicoles du Delta du Fleuve Sénégal. *Revue des sciences de l'eau*, **21**: 325–336. DOI: <https://doi.org/10.7202/018778ar>
- Ndiaye R. 2009. Geographic Information Sciences (GIS): Contribution to Understanding Salt and Sodium Affected soils in the Senegal River Valley: Proquest/UMI.
- Pietikainen J, Kiiikkilä O, Fritze H. 2000. Biochar as a habitat for Microbes and its effect on the Microbial Community of the underlying Humus. *Oikos*, **89**: 231-242. DOI: 10.1034/j.1600-0706.2000.890203.x
- Qadir M, Schubert S, Ghafoor A, Murtaza G. 2001. Amelioration Strategies for Sodic Soils: a review. *Land Degrad. Dev.* **12**: 357–386. DOI: 10.1002/ldr.458
- Rietz DN, Haynes RJ. 2003. Effects of Irrigation-Induced Salinity and Sodicity on soil Microbial Activity. *Soil Biol. Biochem.*, **35**: 845-854. DOI: 10.1016/S0038-0717(03)00125-1
- Rousk J, Elyaagubi FK, Jones DL, Godbold DL. 2011. Bacterial Salt Tolerance is unrelated to Soils Salinity across an Arid Agroecosystem Salinity Gradient. *Soil Biol. Biochem.*, **43**: 1881–1887. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.05.007
- SAED. 2019. Étude Préparatoire pour le Projet de Production de Riz Irrigué dans la

- Vallée du Fleuve Sénégal en République du Sénégal. Agence Japonaise de Coopération Internationale (JICA), *Nippon Koei Co., Ltd.*, p. 313.
- Sall S, Masse D, Bernhard-Reversat F, Guissé A, Chotte JL. 2003. Microbial Activities during the Early Stage of Laboratory Decomposition of Tropical Leaf Litters: The Effect of Interactions between Litter Quality and Exogenous Inorganic Nitrogen. *Biol. Fertil. of Soils*, **39**: 103-111. DOI: 10.1007/s00374-003-0679-1
- Sall SN, Ndour NDY, Diédhiou-Sall S, Dick R, Chotte JL. 2015. Microbial Response to Salinity Stress in a Tropical Sandy Soil amended with Native Shrub Residues or Inorganic Fertilizer. *J. Environ. Manag.*, **161**: 30-37. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.06.017
- Searle PL. 1984. The Berthelot or Indophenol reaction and its use in the Analytical Chemistry of Nitrogen: A review, *Analyst*, **109**: 549-568. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/an9840900549>
- Stein M. 1999. *Interpolation of Spatial Data: some theory for kriging*. Springer Series in Statistics. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4612-1494-6>
- Singh K. 2015. Microbial and Enzyme Activities of Saline and Sodic Soils. *Land Degrad. Dev.*, **27**: 706-718. DOI: 10.1002/ldr.2385
- Sumner ME. 1995. Sodic Soils: new perspectives. In *Australian Sodic Soils: Distribution, Properties and Management*, Naidu R, Sumner ME, Rengasamy P (eds). CSIRO: Melbourne; 1-34.
- Tejada MA, Gonzalez JL. 2006. Crushed Cotton gin Compost on Soil Biological Properties and Rice Yield, *Eur. J. Agron.*, **25**: 22–29. DOI: 10.1016/j.eja.2006.01.007
- Tripathi S, Kumari S, Chakraborty A, Gupta A, Chakrabarti K, Bandyapadhyay BK. 2006. Microbial Biomass and its Activities in Salt-Affected Coastal Soils. *Biol. Fertil. Soils*, **42**: 273–277. DOI: 10.1007/s00374-005-0037-6.
- Yacouba AS, Yadi G, Tchicama MM, Issa NA. 2018. Caractérisation des sols de Guillé Koira et Lassourou dans les communes rurales d’Imanan et Tondikandia au Niger pour une meilleure culture de riz autour des mares. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **12** : 2474-2485. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v12i6.2>.