

L'amendement en gypse améliore les rendements du maïs sur un Lixisol affecté par la pollution saline-sodique

Nongma ZONGO^{1,2*}, Désiré Jean Pascal LOMPO³,
Juliane DAO⁴, Michel Papaoba SEDOGO¹,
Bismarck Hassan NACRO²

Résumé

L'étude vise à améliorer les rendements du maïs (*Zea mays*, L.) sur un Lixisol salin-sodique au moyen d'amendement en gypse et d'irrigation à l'eau propre. Un dispositif expérimental en split-split-plot avec quatre répétitions a été utilisé. Les facteurs étudiés sont : le niveau de dégradation du sol, la qualité de l'eau d'irrigation et la dose d'apport de gypse. Les rendements et paramètres de rendement du maïs ont été mesurés ainsi que les exportations en nutriments. Le modèle linéaire à effets mixtes a servi pour l'analyse des données. Les résultats ont montré que l'eau propre comparativement aux eaux usées a augmenté le rendement grains (51%), les exportations en P (83,4%) et K (18,4%) par la paille et en N (54,7%) et P (48 %) par les grains dans les sols fortement dégradés. Les hausses élevées des rendements paille (50%) et grains (73%) et des exportations en N, P et K (60 %) ont été obtenues avec l'apport du gypse aux sols fortement dégradés. L'application du gypse aux parcelles irriguées avec les eaux usées a induit une augmentation au double en rendement paille sur sols faiblement dégradés et une augmentation au quintuple et au double en rendements paille et grains sur les sols fortement dégradés comparativement aux hausses observées par l'application des mêmes doses de gypse à ces sols irrigués par l'eau propre.

Mots clefs : Eau propre, Gypse, sols salins-sodiques, maïs.

Gypsum improves maize productivity of a saline-sodic affected Lixisol

Abstract

The study aims to improve the yields of maize (*Zea mays*, L.) on a saline-sodic affected Lixisol by using gypsum as amendment and clean water for irrigation. A split-split-plot experimental design with four replications was used. The studied factors included: soil degradation level, irrigation water quality and gypsum rate application. The yields and yield components of maize were assessed as well as nutrient uptakes. The linear mixed effects model was used for data analysis. The results showed that clean water use compared to wastewater increased the grain yield (51%), the P (83.4%) and K (18.4%) exported by straw and the N (54.7%) and P (48%) exported by grains in the highly degraded soils. The high increases in straw (50%) and grain (73%) yields and in the N, P and K uptake (60%) were obtained subsequently to gypsum application in highly degraded soils. Gypsum application to plots irrigated with wastewater induced a twofold increase in maize straw yield in low degraded soils and a fivefold and twofold increases in maize straw and grain yields in highly degraded soils comparatively to the increases observed with the same gypsum rates application to these soils irrigated with clean water.

Keywords: Clean water, Gypsum, Saline-sodic soils, maize

¹ Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique, Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA), Département Gestion des Ressources Naturelles et Systèmes de Production, BP 476 Ouagadougou 01, Burkina Faso

² Université Nazi BONI, Laboratoire d'étude et de recherche sur la fertilité du sol, 01 BP : 1091 Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso

³ Université de Dédougou (UDDG), Laboratoire d'étude et de recherche sur la fertilité du sol, Burkina Faso BP 176 Dédougou, Burkina Faso

⁴ Universität Kassel, Faculty of Organic Agricultural Science, Organic Plant Production and Agroecosystems Research in the Tropics and Subtropics Laboratory, Steinstr. 19, D-37213, Witzenhausen, Allemagne

*Auteur correspondant : arno2000@gmail.com

Introduction

Le développement de l'irrigation de l'agriculture en Afrique Sub-saharienne s'accompagne de répercussions néfastes sur la durabilité des agrosystèmes notamment par l'accumulation de sels solubles ou de sodium échangeable à l'origine des phénomènes d'alcalinisation/sodification des sols. Ces phénomènes sont des processus chimiques de dégradation du sol largement répertoriés dans les zones arides et semi-arides et qui affectent plus de 20 % des terres irriguées dans le monde (MAHANTA *et al.*, 2015; QADIR, 2016). En effet, l'eau d'irrigation reste la principale source de contamination du sol en sels solubles et sodium échangeable (QADIR et OSTER, 2004) car la plupart des projets d'aménagement de plaines irriguées dans ces régions visent à assurer la disponibilité de l'eau sans prendre en compte sa qualité (QADIR, 2016). Aussi, dans les villes, les eaux usées à fortes teneurs en nutriments, en sels solubles et en métaux lourds sont utilisées directement ou sommairement traitées pour la production de légumes frais (DAO, 2017; DRECHSEL *et al.*, 2006; KIBA *et al.*, 2012; SOU, 2009). Les conditions climatiques liées aux faibles précipitations qui réduisent le drainage, à la forte évapotranspiration, aux fortes remontées capillaires de nappes dans les zones arides et semi-arides et aux faibles remontées pour les zones à forte pluviosité ainsi que les fortes teneurs du sol en argile de type kaolinite prédisposent davantage le sol à l'alcalinisation (AHMAD *et al.*, 2006).

L'alcalinisation induit la dispersion des argiles et des matières organiques qui entraîne la déstructuration du sol, la réduction de la perméabilité et de l'infiltration de l'eau. Le sol devient dur et les difficultés de germination, de croissance et de développement des plantes ainsi que des baisses de rendements apparaissent (JESUS *et al.*, 2015). De même, la respiration, les activités enzymatiques, la biomasse et les communautés microbiennes des sols affectés subissent des modifications à la baisse (CHOWDHURY *et al.*, 2011; XIE *et al.*, 2017).

Les plantes cultivées sont pour la plupart ; sensibles aux teneurs élevées du sol en sels et sodium échangeables par opposition à d'autres qui sont tolérantes ou halophiles. Parmi les espèces végétales sensibles, figure le maïs. Tous les stades de son cycle sont anéantis par les teneurs élevées du sol en sodium échangeable. Le taux de germination et l'émergence des plantules sont réduits, la croissance des tiges, les biomasses fraîches et sèches, la surface foliaire ainsi que les rendements grains et biomasses sont réduits. La durée de la levée des plantules est prolongée et la production de l'acide abscissique est accrue (FATMA, 2011). Trois stress sont mis en avant pour expliquer les effets négatifs chez les espèces sensibles suite à l'augmentation de la concentration du sol en sodium échangeable : les stress osmotiques, ioniques et oxydatifs (FATMA, 2011). La sévérité de ces stress dépend cependant de plusieurs facteurs dont l'espèce, la lumière, l'humidité, la concentration ionique, etc ...

Pour la remédiation des propriétés des sols alcalins/sodiques, plusieurs techniques existent. Les principales sont : les amendements chimiques et le drainage à l'eau qui consistent en la lixiviation des sels et ions sodium et à la réduction de la dispersion des argiles et des matières organiques du sol. Quant aux amendements chimiques, il y a le procédé de libération du calcium du sol par l'amélioration de la dissolution des calcites qui est indiqué pour les sols calcaires salins sodiques. Pour ces sols, l'application de l'acide sulfurique comme amendement est le plus recommandé. Aussi, il y a le procédé par apport du calcium au moyen du gypse pour les autres sols salins sodiques. La lixiviation des sels au moyen du drainage par apport d'eau consiste en la percolation grâce à l'application d'un excès d'eau par rapport à la quantité totale utilisée par la culture et à la demande de l'évapotranspiration pendant la saison de croissance (JESUS *et al.*, 2015). Elle se fait aussi par l'irrigation d'un excès d'eau par rapport à la demande évaporative. Pour les sols salins et sodiques affectés, l'application du gypse comme amendement le plus efficace est recommandée (ABROL *et al.*, 1988; CHEN et DICK, 2011) à cause de sa solubilité modérée. Cet amendement améliore les propriétés physiques, chimiques et microbiologiques du sol ainsi que le rendement et la qualité des produits de certaines cultures

(AHMAD *et al.*, 2016; FAGERIA *et al.*, 2011; KAMEL *et al.*, 2016). Son application suivant les besoins du sol alcalinisé entraîne la réduction de la dispersion des particules du sol, limite la formation des croutes, augmente le taux d'infiltration et améliore la circulation de l'eau ainsi que l'émergence des semis (CHEN et DICK, 2011). CHEN et DICK, (2011) ont aussi rapporté une réduction de l'érosion du sol et des pertes de nutriments par ruissellement particulièrement le phosphore avec les amendements du gypse.

Malgré une forte tendance à l'augmentation des surfaces en sols affectés par l'alcalinisation et la sodification avec l'augmentation des terres irriguées par les eaux usées urbaines et, le revers des changements climatiques, on note une minorité de travaux sur l'application du gypse pour la remédiation des sols salins et sodiques affectés dans les villes d'Afrique Sub-saharienne. L'objectif de cette étude est d'améliorer les performances (rendements et exportations) de la culture du maïs sur un Lixisol salin-sodique affecté en utilisant l'amendement gypse et l'irrigation à l'eau propre des parcelles. Nous partons des hypothèses que l'irrigation à l'eau propre (i) et l'application du gypse (ii) améliorent les rendements du maïs sur le sol urbain maraicher alcalinisé.

I. Matériel et méthodes

1.1. Site d'étude

L'étude a été conduite à Ouagadougou au Burkina Faso ; sur le site maraicher de Kossodo (12° 25' 44,277'' N et 1° 28' 22,394'' O ; 300 m altitude). Le site a été aménagé pour bénéficier des eaux usées prétraitées par lagunage dans la station de traitement des eaux usées urbaines et industrielles (STEP). Ce système de traitement conçu pour traiter 66 % en volume et 72 % en charge de polluants des eaux usées d'origine industrielles (brasserie, abattoir et cimenterie, huilerie, fer, acier, usines de tôles) est un lagunage à microphyte constitué de trois bassins anaérobies reliés de manière parallèle à deux bassins facultatifs. Ces bassins facultatifs sont reliés à trois bassins de maturation qui fonctionnent en parallèle. Le périmètre agricole aménagé couvre une superficie de 35 ha. La caractérisation initiale du site (Tableau I) a été faite par DAO *et al.* (2019). Le sol classé de Lixisol (WRB, 2015) s'est avéré très tôt pollué en sels de sodium ; affectant ainsi la productivité des cultures. Cela a occasionné l'abandon du site par les producteurs bénéficiaires.

Tableau I : Caractéristiques chimiques initiales des sols du site maraicher de Kossodo de l'horizon 0-20 cm (Mars 2013)

Paramètres	Unité	Sols fortement dégradés		Sols moyennement dégradés		Sols faiblement dégradés	
		Moyenne	Erreur standard	Moyenne	Erreur standard	Moyenne	Erreur standard
pH _{eau}	–	8.44	0.05	8.16	0.03	7.32	0.11
CE	μS.cm ⁻¹	597	31.5	502.06	16.7	292	46.6
PSE	%	25.7	0.97	24.7	0.58	11.6	1.21

PSE=Pourcentage de sodium échangeable ; CE = Conductivité électrique.

Source : DAO *et al.* (2019)

1.2. Dispositif expérimental et pratique culturale

Le dispositif expérimental est un split-split plot avec quatre répétitions implantées en 2014.

En 2014, les sols des champs du site ont été préalablement caractérisés et regroupés en trois niveaux de dégradation correspondant aux valeurs de pH du sol qui sont étroitement liées à l'alcalinité (DAO *et al.*, 2019). Pour chaque niveau de dégradation du sol, quatre champs de dimension chacune 9 m x 18 m ont été choisis. Chaque champ a été divisé en trois parcelles.

En 2016 ; pour cette étude, deux des trois parcelles ont été considérées. Il s'agit de la parcelle irriguée à l'eau usée et de la parcelle irriguée à l'eau propre. Chacune de ces deux parcelles a ensuite été subdivisée en deux sous-parcelles dont l'une est traitée au gypse et l'autre non traitée au gypse. Les trois facteurs ainsi considérés sont : le niveau de dégradation du sol (SDL) qui comporte trois niveaux classés suivant leur valeur de pH : Faible ($6 < \text{pH} \leq 7$), Moyen ($7 < \text{pH} \leq 8$) et Fort ($\text{pH} > 8$). Le deuxième facteur est la qualité de l'eau d'irrigation avec deux niveaux : eaux usées prétraitées et eau propre. L'eau propre provient du système de distribution de l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA). Elle a été utilisée pendant la campagne sèche (Octobre 2015 à Avril 2016) pour la production des épinards. Elle a servi de moyen de lixiviation des sels de sodium. L'eau usée prétraitée est issue des canaux aménagés à ciel ouvert du système d'irrigation du site. Elle a été recyclée au moyen du lagunage dans la station de traitement et d'épuration d'eaux usées (STEP) de Kossodo. Les caractéristiques chimiques de l'eau usée et de l'eau propre sont présentées dans le Tableau II. Le troisième facteur est la dose d'apport de gypse avec deux niveaux : 0 t ha^{-1} et la dose requise de gypse (12 t ha^{-1} pour les sols fortement dégradés ou 8 t ha^{-1} pour les sols moyennement dégradés ou 4 t ha^{-1} pour les sols faiblement dégradés). La dose requise de gypse est déterminée suivant la formule de la FAO (ABROL *et al.*, 1988) et reprise par RASOULI *et al.* (2013). Le gypse utilisé est en granules fins de diamètre inférieur à 1 mm avec une pureté de 85 %.

L'expérimentation a été conduite en 2016 au cours de la saison pluvieuse (Juin à Octobre) avec la culture de maïs (*Zea mays L.*), connue pour sa sensibilité au sodium échangeable du sol (ABROL *et al.*, 1988). La variété de maïs utilisée est la K.E.J. (Kamboinsé Extra Précoce Jaune) qui est adaptée aux conditions climatiques de la zone d'étude. Sur toutes les parcelles, un labour d'environ 15 cm de profondeur suivi de l'application de fumier de bovins ($10,2 \text{ t ha}^{-1}$) a été réalisé. Les engrais NPK-SB (14-23-14-6-1) à raison de 150 kg ha^{-1} et l'urée (46 % N) à la dose de 100 kg ha^{-1} ont été appliqués sur toutes les parcelles. Le NPK-SB a été appliqué au 16^{em} jours après le semis. L'urée a été appliquée en deux tranches égales au 23^{em} et au 40^{em} jour après le semis. Le traitement des plants au 44^{em} jour après le semis avec l'insecticide D-Cis a permis de maîtriser l'attaque des chenilles défoliatrices et foreuses des tiges de maïs.

Tableau II : Caractéristiques chimiques des eaux usées prétraitées et de l'eau propre utilisées

Paramètres	Unité	Eau propre		Eaux usées prétraitées	
		Moyenne	Erreur standard	Moyenne	Erreur standard
pH	-	8,71	0,32	9,01	0,14
EC	μs	286	73,0	2277	26,6
SAR	-	0,73	0,11	8,89	0,06
Total N		1,77	0,73	6,49	1,35
Total P		0,43	0,15	18,0	0,71
Total K		10,4	3,07	51,9	1,17
Mg		4,50	1,32	4,25	2,02
Ca		27,5	9,18	266	5,46
Na		15,7	4,40	514	18,6
Cl		14,5	5,38	13,2	7,43
Total COD	mg L^{-1}	22,2	9,20	868	16,1

Source : DAO *et al.* (2019)

1.3. Paramètres suivis

Les échantillons de la paille et des grains du maïs ont été collectés à la récolte. Ils proviennent des plantes issues des quatre poquets de semis centraux du carré de rendement de la parcelle. Ces échantillons ont été d'abord séchés à l'ombre puis à l'étuve à 60°C jusqu'à poids constant.

Les rendements paille et grains du maïs ont été déterminés. Les exportations des nutriments azote (N), phosphore (P), potassium (K), calcium (Ca) et sodium (Na) par la paille et les grains ont été calculées en multipliant leurs teneurs dans chacune des deux parties récoltées par leurs rendements.

1.4. Analyses chimiques

Les teneurs en N des échantillons ont été déterminées par voie de combustion sèche selon la méthode de DUMAS à l'aide de l'auto-analyseur C/N Vario MAX (Elementar Analysensysteme GmbH, Langenselbold, Allemagne).

Pour la détermination des teneurs des éléments P, K, Ca et Na, les échantillons ont été d'abord calcinés. Ces éléments ont été ensuite extraits suivant la technique du VDLUFA (NAUMANN et BASSLER, 1976). Le phosphore (P) a été dosé par spectrophotométrie (Hitachi U-2000, Hitachi Ltd, Tokyo, Japon) à 460 nm. Le potassium (K), le sodium (Na) et le calcium (Ca) ont été dosés par photométrie de flamme (BWB-XP Technologies Ltd, BWB Technology UK Ltd, Halstead, Essex, Royaume-Uni).

1.5. Analyse statistique des données

Le modèle linéaire à effets mixtes estimé par la méthode de la vraisemblance maximale a été utilisé pour déterminer l'influence du niveau de dégradation du sol, de la dose d'apport de gypse et de la qualité de l'eau d'irrigation ainsi que leurs interactions sur les rendements et les exportations de nutriments par le maïs. Le logiciel d'analyse statistique R version 4.0.2 (R CORE TEAM, 2018), l'interface RStudio version 1.3.1093 et le package lme4 de la fonction glmer ont été utilisés à cet effet. Les champs des producteurs ont été considérés comme les effets aléatoires du modèle linéaire mixte. Les valeurs de p pour les t-tests utilisés ont été obtenues par approximation de la méthode de Satterthwaite et de la fonction lmerTest (KUZNETSOVA *et al.*, 2017). Sur le modèle ajusté, un test d'analyse des variances ANOVA à trois facteurs a été réalisé pour déterminer l'effet de chaque facteur étudié ainsi que leurs interactions.

Pour illustrer l'effet des niveaux des facteurs et des interactions sur les variables évaluées, les moyennes ajustées Lsmeans ont été calculées. La fonction emmeans a été utilisée (LENTH *et al.*, 2021). Les comparaisons par paires de ces moyennes ont été faites par la méthode de Tukey grâce au package multcompView (GRAVES *et al.*, 2019). La séparation des moyennes statistiquement significatives a été faite au seuil de 5 % de probabilité.

II. Résultats

2.1. Variations des rendements et des exportations de nutriments par le maïs suivant le niveau de dégradation du sol

Les rendements paille et grains du maïs ont été similaires quel que soit le niveau de dégradation du sol (Tableaux III et IV).

Par contre, les exportations de Na et de Ca par la paille et par les grains du maïs ont augmenté avec le niveau de dégradation du sol. La hausse des exportations en Na par la paille du maïs observée dans les sols moyennement dégradés et dans les sols fortement dégradés équivaut respectivement à 1 et 3 fois l'exportation de Na par la paille du maïs dans les sols faiblement

dégradés. L'exportation du Na par les grains a augmenté de 37,5 % et de 50 % respectivement dans les sols moyennement et fortement dégradés comparativement à celle observée dans les sols faiblement dégradés. L'exportation du Ca par la paille et par les grains du maïs a augmenté respectivement de 60,8 % et 87,6 % dans les sols fortement dégradés comparativement à celle observée dans les sols faiblement dégradés.

2.2. Variations des rendements et des exportations de nutriments suivant la qualité de l'eau d'irrigation et de l'interaction avec le niveau de dégradation du sol

L'irrigation des parcelles à l'eau propre comparativement à celle par les eaux usées prétraitées augmente le rendement grains du maïs (Tableaux III et IV). Le rendement grains observé dans les sols fortement dégradés a augmenté de 51 % suite à l'irrigation des champs à l'eau propre comparativement à l'irrigation par les eaux usées. Les exportations en P et K de la paille et en N et P des grains du maïs ont augmenté avec l'irrigation des parcelles à l'eau propre comparativement à celles irriguées par les eaux usées prétraitées (Tableaux III et IV). Pour les exportations en P et en K par la paille, l'irrigation d'eau propre par rapport à celle par les eaux usées prétraitées a induit une augmentation respectivement de 83,4 % et 18,3 % dans les sols fortement dégradés. L'augmentation des exportations en N et P des grains due à l'irrigation d'eau propre comparativement à l'irrigation continue par les eaux usées prétraitées est de 54,7 % et 48 % dans les sols fortement dégradés. Celles en N, Ca et Na de la paille ainsi qu'en Na des grains ont diminué suite à l'irrigation des champs à l'eau propre comparativement à ceux irrigués par les eaux usées prétraitées (Tableaux III, IV et V). L'exportation de N par la paille du maïs a baissé de 42,7 kg N ha⁻¹ à 34,9 kg N ha⁻¹ avec l'utilisation d'eau propre comparativement aux eaux usées dans les sols moyennement dégradés. Celle en Ca par la paille a été de 25,5 % et 18,1 % respectivement dans les sols faiblement dégradés et fortement dégradés. La baisse de l'exportation du Na par la paille du maïs due à l'irrigation des champs par l'eau propre comparativement à celle par les eaux usées prétraitées a été de 76,9 % dans les sols faiblement dégradés. Dans les sols moyennement dégradés, l'exportation du Na par les grains a diminué de 35,7 % avec l'irrigation des champs à l'eau propre comparativement à l'irrigation par les eaux usées.

2.3. Variations des rendements et des exportations de nutriments suivant l'apport du gypse et de ses interactions avec la qualité de l'eau d'irrigation et le niveau de dégradation du sol

Les champs ayant reçu le gypse ont connu une amélioration des performances du maïs comparativement à ceux non amendés (Tableaux III, IV et V).

Sur les sols faiblement dégradés et sur les sols fortement dégradés, le rendement paille du maïs obtenu avec l'apport du gypse est de 1,24 et 1,77 fois ceux observés avec le traitement sans apport de gypse. Le rendement en grains trouvé sur les sols fortement dégradés avec l'apport du gypse a été de 1,73 fois celui du traitement sans apport de gypse.

Ces augmentations des rendements dépendent aussi de la qualité de l'eau d'irrigation. En effet, dans les sols faiblement dégradés et irrigués à l'eau propre, l'amendement du gypse comparé au non amendement du gypse a induit une hausse de 0,77 t ha⁻¹ du rendement paille. Avec l'utilisation d'eaux usées sur ces sols faiblement dégradés, les variations du rendement paille observées entre l'application du gypse (3,16 t ha⁻¹) et la non application de gypse (2,71 t ha⁻¹) n'ont pas été significatives. Dans les sols moyennement dégradés et irrigués par les eaux usées, l'amendement du gypse a augmenté le rendement paille de 1,19 t ha⁻¹ et le rendement grains de 0,83 t ha⁻¹. Dans les sols fortement dégradés et irrigués avec les eaux usées, la hausse induite par l'apport du gypse a été de 2,57 t ha⁻¹ sur le rendement paille et de 1,03 t ha⁻¹ pour le rendement grains du maïs. Par contre, avec l'irrigation à l'eau propre des parcelles, l'apport du gypse n'a augmenté les rendements que dans les sols fortement dégradés (0,5 t ha⁻¹).

L'application du gypse a induit une augmentation des exportations en N et en P par la paille et par les grains du maïs ainsi que des exportations en K par les grains (Tableaux III et IV). Dans les sols faiblement dégradés, les exportations en N de la paille et en K des grains ont augmenté de 13,09 % et 20,31 % respectivement avec l'apport du gypse par rapport aux champs non amendés par le gypse. Dans les sols fortement dégradés, l'apport du gypse a augmenté les exportations en N, en P et en K de 60 % par rapport au traitement sans apport de gypse.

L'augmentation des exportations en P de la paille et en N et P des grains ont été plus importantes avec l'amendement du gypse aux champs irrigués par les eaux usées dans les sols fortement dégradés. Quant aux augmentations des exportations de K par les grains suite à l'application du gypse, elles ont varié suivant la qualité de l'eau d'irrigation utilisée. Dans les sols faiblement dégradés, l'application du gypse a induit une augmentation des exportations en K des grains de 2,92 kg ha⁻¹ avec l'eau propre et de 1,77 kg ha⁻¹ avec l'eau usée. En revanche, dans les sols fortement dégradés, l'application du gypse a induit sur les exportations en K des grains, une augmentation de 11,22 kg ha⁻¹ avec l'eau usée et de 0,5 kg ha⁻¹ avec l'eau propre.

Seules les exportations en Ca et en Na des grains du maïs ont subi une baisse suite à l'application du gypse comparativement à la non application du gypse (Tableaux III et V). L'apport du gypse comparé au non apport de gypse a baissé les exportations en Ca et en Na dans les grains du maïs de 30,0 % et 54,6 % dans les sols faiblement dégradés. Aussi, une baisse de 40,68 % des exportations en Ca par les grains a été observée avec l'apport du gypse par rapport au non apport de gypse sur les parcelles irriguées à l'eau propre dans les sols faiblement dégradés.

Tableau III : Valeurs F et niveau de signification à partir de l'ANOVA à trois facteurs comparant les rendements (paille et grains) et les exportations de nutriments par le maïs

Source de variation	df	Rendements				Exportations							
		N		P		K		Ca		Na			
		Paille	Grains	Paille	Grains	Paille	Grains	Paille	Grains	Paille	Grains	Paille	Grains
NDS	2	4,25 ^{ns}	3,04 ^{ns}	1,16 ^{ns}	2,76 ^{ns}	3,17 ^{ns}	2,76 ^{ns}	0,81 ^{ns}	2,54 ^{ns}	29,62 ^{***}	12,66 ^{***}	4,97 [*]	4,56 [*]
Qual	1	2,32 ^{ns}	4,05 [*]	0,08 ^{ns}	3,60 ^{ns}	1,49 ^{ns}	2,98 ^{ns}	7,92 [*]	0,90 ^{ns}	20,50 ^{***}	0,45 ^{ns}	8,80 [*]	4,06 ^{ns}
Gyp	1	32,98 ^{***}	15,67 ^{***}	8,00 ^{**}	11,52 ^{**}	3,61 ^{ns}	13,50 ^{***}	0,43 ^{ns}	25,13 ^{***}	0,09 ^{ns}	9,33 ^{**}	2,76 ^{ns}	10,36 ^{**}
NDS x Qual	2	2,84 ^{ns}	3,10 ^{ns}	7,70 ^{**}	3,84 [*]	1,57 ^{ns}	3,26 [*]	2,01 ^{ns}	2,72 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,45 ^{ns}	4,55 [*]	2,46 ^{ns}
NDS x Gyp	2	2,26 ^{ns}	2,84 ^{ns}	4,42 [*]	2,37 ^{ns}	2,17 ^{ns}	2,48 ^{ns}	0,29 ^{ns}	2,57 ^{ns}	2,91 ^{ns}	3,09 ^{ns}	1,37 ^{ns}	2,79 ^{ns}
Qual x Gyp	1	9,63 ^{**}	12,01 ^{**}	3,77 ^{ns}	9,97 ^{**}	0,06 ^{ns}	14,60 ^{***}	23,89 ^{***}	16,82 ^{***}	0,62 ^{ns}	5,56 [*]	2,99 ^{ns}	0,19 ^{ns}
NDS x Qual x Gyp	2	4,03 [*]	0,61 ^{ns}	0,71 ^{ns}	0,33 ^{ns}	1,41 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,18 ^{ns}	4,49 ^{ns}	2,81 ^{ns}	1,73 ^{ns}	2,97 ^{ns}	0,51 ^{ns}

NDS = Niveau de dégradation du sol ; Qual = Qualité de l'eau d'irrigation ; Gyp = Dose d'apport de gypse ; ns = non significatif ; * = P < 0,05 ; ** = P < 0,01 ; *** = P < 0,001

Tableau IV : Valeurs moyennes (écart type) des rendements paille et grains et des exportations en éléments nutritifs N, P et K du maïs suivant les traitements appliqués dans les sols faiblement dégradés, moyennement dégradés et fortement dégradés

NDS	Qual	Gyp	Rendements (t ha ⁻¹)		Exportations (kg ha ⁻¹)						
			Paille	Grains	N		P		K		
			Paille	Grains	Paille	Grains	Paille	Grains	Paille	Grains	
Faible	EUR	Sans Gr	2,71 (0,53)a	1,26 (0,46)ab	30,39 (10,04)b	24,48 (8,76)	3,95 (1,39)	2,55 (0,93)	144,11 (13,51)	11,96 (2,34)a	
		Gr	3,16 (0,86)a	1,72 (0,72)a	37,18 (14,69)a	32,33 (13,44)	3,42 (1,41)	3,58 (1,49)	172,36 (23,41)	13,73 (4,17)a	
	EP	Sans Gr	2,58 (0,66)b	1,63,(0,19)a	29,21 (9,59)a	30,56 (4,26)	3,36 (1,99)	3,33 (0,46)	175,22 (20,23)	11,08 (2,64)b	
		Gr	3,35 (0,83)a	1,52 (0,84)a	30,23 (10,47)a	27,70 (15,55)	3,91 (1,19)	2,98 (1,61)	155,15 (13,74)	14,00 (3,29)a	
	Moyenne NDS Niveau Faible			2,95 (0,73)	1,53 (0,57)	31,75 (10,70)	28,77 (10,63)	3,66 (1,39)	3,11 (1,16)	161,71 (20,95)	12,69 (3,12)
	Probabilité Qual			0,933	0,724	0,329	0,871	0,952	0,856	0,478	0,847
Probabilité Gyp			0,007	0,459	0,050	0,574	0,979	0,486	0,675	0,006	
Moyen	EUR	Sans Gr	2,92 (0,78)a	1,37 (0,39)a	41,60 (11,34)a	27,38 (7,81)	2,99 (1,57)	2,83 (0,83)	142,66 (15,69)	12,87 (3,48)	
		Gr	4,11 (0,37)b	2,20 (0,23)b	43,87 (3,43)a	41,58 (5,05)	3,60 (1,16)	4,33 (0,36)	160,44 (23,42)	17,03 (0,65)	
	EP	Sans Gr	3,66 (0,27)b	1,87 (0,58)ab	36,24 (4,34)b	35,31 (11,13)	3,42 (1,02)	3,69 (1,15)	171,10 (49,04)	15,80 (1,15)	
		Gr	3,4 (0,75)b	1,65 (0,47)a	33,68 (9,22)b	31,80 (10,01)	3,23 (1,23)	3,25 (0,81)	148,43 (31,37)	14,04 (2,83)	
	Moyenne NDS Niveau Moyen			3,52 (0,69)	1,77 (0,5)	38,85 (8,16)	34,02 (9,53)	3,31 (1,15)	3,52 (0,94)	155,66 (31,07)	14,94 (2,66)
	Probabilité Qual			0,941	0,915	0,038	0,844	0,962	0,806	0,545	0,652
Probabilité Gyp			0,134	0,202	0,954	0,244	0,569	0,244	0,881	0,284	
Fort	EUR	Sans Gr	1,02 (1,02)b	0,61 (0,23)d	16,51 (17,97)	12,57 (4,75)d	0,97 (1,01)c	1,23 (0,47)d	146,23 (23,73)b	4,46 (4,46)b	
		Gr	3,59 (0,43)a	1,64 (0,23)b	41,86 (11,48)	30,95 (4,78)b	2,53 (0,67)b	3,31 (0,46)b	169,89 (33,45)b	15,68 (1,80)a	
	EP	Sans Gr	3,05 (0,73)a	1,45 (0,32)c	39,06 (15,35)	29,75 (7,50)c	2,76 (1,08)ab	3,01 (0,58)c	194,00 (34,73)a	14,21 (2,74)a	
		Gr	3,61 (0,60)a	1,93 (0,32)a	47,01 (9,89)	37,58 (6,18)a	3,66 (1,73)a	3,71 (0,61)a	180,14 (22,29)a	14,77 (2,43)a	
	Moyenne NDS Niveau Fort			2,82 (1,27)	1,41 (0,56)	36,11 (17,40)	27,71 (10,91)	2,48 (1,46)	2,82 (1,09)	172,56 (31,65)	12,28 (1,36)
	Probabilité Qual			0,12	0,028	0,117	0,016	0,024	0,032	0,005	0,148
Probabilité Gyp			0,002	< 0,001	0,103	0,002	0,050	0,001	0,383	0,022	

NDS = Niveau de dégradation du sol ; Qual = Qualité de l'eau d'irrigation ; Gyp = Dose d'apport de gypse ; EUR = eaux usées prétraitées ; EP = eau propre ; Sans Gr = 0 t ha⁻¹ de gypse (Sans gypse) ; Gr = Dose requise de gypse.

Dans les sols faiblement dégradés, moyennement dégradés ou fortement dégradés, les traitements suivis de la même lettre minuscule dans la même colonne ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5% de probabilité. Dans la même colonne, les traitements suivis de la même lettre capitale dans la même colonne ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5% de probabilité.

Tableau V : Valeurs moyennes (écart type) des exportations en éléments nutritifs du maïs suivant les traitements appliqués dans les sols faiblement dégradés, moyennement dégradés et fortement dégradés

NDS	Qual	Gyp	Exportations (kg ha ⁻¹)				
			Ca		Na		
			Paille	Grains	Paille	Grains	
Faible	EUR	Sans Gr	42,50 (4,55) a	1,83 (0,57) a	11,03 (4,20) a	0,11 (0,12) b	
		Gr	47,59 (3,73) a	1,46 (0,57) a	9,23 (5,13) a	0,04 (0,02) b	
	EP	Sans Gr	32,95 (7,51) b	1,77 (0,62) a	3,25 (2,69) b	0,11 (0,04) a	
		Gr	34,16 (5,58) b	1,05 (0,05) b	1,44 (0,53) b	0,05 (0,03) b	
	Moyenne NDS Niveau Faible			39,30 (7,96) B	1,53 (0,56) B	6,24 (5,23) B	0,08 (0,07) B
	Probabilité Qual			< 0,001	0,334	< 0,001	0,82
Probabilité Gyp			0,153	0,017	0,195	0,013	
Moyen	EUR	Sans Gr	56,62 (13,56)	1,79 (0,47)	18,70 (7,55)	0,16 (0,05) a	
		Gr	45,92 (8,76)	2,97 (2,24)	12,34 (5,04)	0,12 (0,02) a	
	EP	Sans Gr	41,05 (4,64)	2,40 (0,03)	11,07 (5,95)	0,09 (0,02) b	
		Gr	42,44 (4,75)	1,50 (0,59)	8,06 (8,04)	0,08 (0,05) b	
	Moyenne NDS Niveau Moyen			46,51 (10,03) B	2,17 (1,21) AB	12,54 (7,25) A	0,11 (0,04) A
	Probabilité Qual			0,108	0,925	0,09	0,005
Probabilité Gyp			0,209	0,243	0,072	0,277	
Fort	EUR	Sans Gr	68,45 (15,23) a	2,44 (0,06)	11,72 (16,40)	0,13 (0,09)	
		Gr	70,48 (6,91) a	2,45 (0,07)	16,33 (7,03)	0,13 (0,03)	
	EP	Sans Gr	56,17 (6,59) b	4,09 (3,36)	18,02 (10,08)	0,13 (0,04)	
		Gr	57,67 (12,96) b	2,50 (0,08)	10,78 (6,11)	0,10 (0,03)	
	Moyenne NDS Niveau Fort			63,19 (11,88) A	2,87 (1,67) A	14,21 (10,06) A	0,12 (0,01) A
	Probabilité Qual			0,050	0,929	0,638	0,359
Probabilité Gyp			0,662	0,734	0,843	0,587	

NDS = Niveau de dégradation du sol ; Qual = Qualité de l'eau d'irrigation ; Gyp = Dose d'apport de gypse ; EUR = eaux usées prétraitées ; EP = eau propre ; Sans Gr = 0 t ha⁻¹ de gypse (Sans gypse) ; Gr = Dose requise de gypse.

Dans les sols faiblement dégradés, moyennement dégradés ou fortement dégradés, les traitements suivis de la même lettre minuscule dans la même colonne ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5% de probabilité. Dans la même colonne, les traitements suivis de la même lettre capitale dans la même colonne ne sont pas statistiquement différents au seuil de 5% de probabilité.

III. Discussion

3.1. Influence du niveau de dégradation du sol sur les performances du maïs

Les rendements du maïs ont été similaires dans les trois niveaux de dégradation du sol. La faiblesse des rendements constatés par rapport au potentiel de 3,5 t ha⁻¹ pour cette variété de maïs est liée en partie à la mauvaise répartition des pluies. Cependant, les hausses des

exportations en Na et Ca par la paille et par les grains du maïs sur sols moyennement et fortement dégradés par rapport à celles sur sols faiblement dégradés illustrent une réponse d'adaptation du maïs aux stress salins et alcalins. En effet, la concentration élevée en Na^+ échangeable dans la solution du sol entraîne sur le maïs ; des changements physiologiques et morphologiques à l'origine de la réduction de la croissance et donc de pertes de rendements (FATMA, 2011; TURAN *et al.*, 2011). Ainsi, nous pourrions affirmer que l'influence de l'alcalinité du sol a été effective sur la croissance et le développement des plants ainsi que sur les rendements du maïs principalement dans les sols moyennement et fortement dégradés. Cependant, du fait de la hausse des exportations de Ca observée dans ces sols par rapport aux sols faiblement dégradés, les effets dépressifs du sodium sur les rendements ont été atténués voir anéantis.

3.2. Effets de la qualité de l'eau d'irrigation sur les rendements et les exportations de nutriments par le maïs

L'augmentation du rendement grains du maïs dans les sols fortement dégradés suite à l'irrigation par l'eau propre comparativement à l'irrigation avec les eaux usées résulterait de la réduction de l'alcalinité du sol par drainage de sodium solubles de la couche rhizosphérique des plants de maïs (DAO *et al.*, 2019). Le drainage par l'eau propre de sels solubles de sodium aurait réduit les effets antagonistes de l'absorption des nutriments (N, P et K) se traduisant par l'augmentation des exportations de ces nutriments par le maïs au niveau des sols fortement dégradés. Dans les sols fortement dégradés, l'irrigation avec l'eau propre augmente les exportations en K et baissent celles en Ca par rapport à l'eau usée. Cela confirme la réduction de l'alcalinité par l'irrigation à l'eau propre qui se traduit chez le maïs par la suppression des effets d'adaptation précédemment enregistrées. En effet, l'adaptation du maïs au stress sodique se fait par l'absorption importante de Ca que de K (FATMA, 2011; TURAN *et al.*, 2011).

Dans les sols moyennement dégradés, les rendements paille et grains obtenus avec l'eau propre et les eaux usées sont similaires et cela malgré la faible exportation de Na par la paille obtenue avec l'eau propre. Ce résultat pourrait s'expliquer par la baisse des exportations en N par la paille.

3.3. Influence de l'apport du gypse et de ses interactions avec la qualité de l'eau d'irrigation et le niveau de dégradation du sol sur les rendements et les exportations de nutriments par le maïs

Le rendement en paille dans les sols faiblement et fortement dégradés et le rendement en grains du maïs dans les sols fortement dégradés ont été augmentés suite à l'application du gypse comparativement à la non application du gypse à cause de la baisse du pH et de la concentration en Na^+ échangeable du sol (DAO *et al.*, 2019). Aussi, la hausse des exportations en P par la paille et en N, P et K par les grains du maïs dans les sols fortement dégradés et la hausse des exportations en K des grains ainsi que les baisses des exportations en Na et Ca des grains du maïs dans les sols faiblement dégradés suite à l'amendement du gypse résultent d'une amélioration des conditions de nutrition des plantes du maïs. En effet, la dissolution du gypse appliqué aux champs augmente la concentration des ions Ca^{2+} qui vont remplacer les ions Na^+ dans les colloïdes du sol. Les ions Na^+ sont lessivés plus tard entraînant la diminution du pH et de concentration en Na^+ échangeable du sol. Cela limite la dispersion des particules d'argiles et les matières organiques du sol, améliorant ainsi la stabilité de la structure du sol ainsi que sa rétention d'eau (CHAGANTI *et al.*, 2015) et d'éléments nutritifs particulièrement le P (CHEN et DICK, 2011), offrant alors aux racines des plantes, de meilleures conditions de nutrition.

Les augmentations de rendements (paille et grains), des exportations de N, P et K et les baisses des exportations en Ca et en Na observées suite à l'amendement du gypse dépendent cependant du niveau de dégradation du sol et de la qualité de l'eau d'irrigation utilisée. Les hausses des

rendements en paille et en grains du maïs obtenues par l'amendement du gypse par rapport au non apport du gypse croissent avec l'état de dégradation du sol et principalement dans les champs irrigués par les eaux usées prétraitées où les plus fortes augmentations ont par ailleurs été constatées. Ce résultat montre une forte efficacité du gypse dans l'amélioration des rendements paille et grains des sols à alcalinité élevée.

La hausse du rendement paille constatée dans les sols faiblement dégradés et irrigués par l'eau propre pourrait s'expliquer par une forte disponibilité et une meilleure assimilation du K suivi de son transfère dans les grains d'autant plus que des baisses ont été constatées dans les exportations de Ca et de Na par les grains. Une forte disponibilité du K consécutive à l'apport du gypse ne peut être liée qu'à une moindre activité des ions Ca^{2+} libérés car les teneurs en K du sol baissent avec l'apport du gypse (DAO *et al.*, 2019). Cette faible activité des ions Ca^{2+} s'expliquerait par les faibles doses d'apport de gypse et le niveau d'alcalinité faible de ces sols (sols faiblement dégradés) avec la lixiviation du sodium par l'utilisation de l'eau propre. La réduction du pH et de la concentration en Na^+ échangeable à la suite de l'apport du gypse serait le facteur principal à l'origine de meilleures conditions de nutrition des plants de maïs avec pour corollaire, la hausse constatée sur les rendements.

En dehors du rendement paille et des exportations en K par les grains dans les sols faiblement dégradés qui ont été en hausse, l'application du gypse comparativement à la non application du gypse aux champs irrigués par l'eau propre n'a induit aucune amélioration significative des autres paramètres du maïs. Il n'est donc pas recommandé d'apporter ces doses de gypse aux sols préalablement irrigués avec de l'eau propre. Ce résultat s'expliquerait d'une part, par la baisse du K^+ échangeable constatée et vraisemblablement de celle en Mg^{2+} échangeable à la suite de l'augmentation des ions Ca^{2+} due aux doses de gypse appliquées ainsi que par les pertes importantes en nutriments solubles N (nitrates) et P au cours du drainage des ions solubles de Na^+ par l'irrigation des champs à l'eau propre. Aussi, l'existence d'un gradient d'accumulation de ces éléments qui s'accroît avec le niveau de dégradation du sol et qui est lié à l'historique de la gestion des champs (irrigations et fertilisations) justifierait ces résultats.

Les hausses des exportations en P par la paille et de celles en N, P et K par les grains du maïs constatées uniquement dans les sols fortement dégradés à la suite de l'application du gypse aux champs irrigués par les eaux usées illustrent que plus l'alcalinité du sol est élevée, plus la hausse des exportations des nutriments N, P et K par le maïs est importante avec l'amendement gypse. Les effets dépressifs de la hausse de l'alcalinité du sol due à l'irrigation avec les eaux salines-sodiques sur la croissance et le développement du maïs dans les champs sans apport de gypse, l'existence d'un gradient de fertilité lié à l'état de dégradation du sol et l'effet améliorant des propriétés chimiques et physiques du sol par l'application du gypse expliquent ces résultats.

Nos résultats diffèrent de ceux trouvés par DAO *et al.* (2019) qui ont constaté des effets non significatifs de l'application du gypse sur les rendements du maïs. Par ailleurs, ces auteurs ont trouvé une augmentation de la longueur des racines du maïs suite à l'application du gypse. Cette augmentation de la croissance racinaire du maïs se justifie par la réduction de l'alcalinité et du pH du sol par le gypse car, ces mêmes auteurs ont confirmé que la longueur des racines (la croissance des racines) du maïs était négativement corrélée à la concentration en Na^+ échangeable et à l'augmentation du pH du sol.

Dans les sols moyennement dégradés, les rendements similaires constatés avec l'amendement gypse seraient dus aux faibles disponibilités de nutriments principalement le P et la faible hausse du rapport $[\text{Ca}^{2+}] / [\text{Mg}^{2+}]$ constatées.

Conclusion

L'utilisation des eaux usées en agriculture urbaine et péri-urbaine est une pratique commune dans les zones arides et semi-arides d'Afrique Sub-saharienne. Cette pratique abaisse les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol notamment par des phénomènes d'alcalinisation et entraîne leur dégradation. Cette recherche est une contribution à l'amélioration de la productivité de la culture du maïs dans un Lixisol urbain affecté par la sodicité de l'eau d'irrigation provenant du recyclage des eaux usées urbaines dans une station de lagunage à microphyte. L'eau propre comme un moyen de drainage des sels solubles et le gypse comme un amendement chimique ont été utilisés à cet effet.

L'étude révèle que l'irrigation par l'eau propre des champs durant une partie de la saison agricole en l'occurrence sèche améliore les rendements du maïs dans les sols à forte alcalinité. Ce résultat confirme notre (i). Cela permet de replacer les agriculteurs sur le site. Malheureusement, cette option de remédiation du sol représente un grand défi dans cette partie aride de l'Afrique Sub-saharienne où les besoins et l'utilisation domestique de l'eau saine par les ménages est déjà gravement compromise par les pénuries. Aussi, les résultats révèlent que l'amendement du gypse est plus efficace pour améliorer les rendements du maïs ; ce qui soutient l'hypothèse (ii). Son application aux champs doit cependant être raisonnée. Cette étude ouvre de nouvelles perspectives de recherche sur l'impact de l'application du gypse sur les pertes de nutriments du sol, la disponibilité en P, la conductivité électrique et sur les propriétés microbiologiques du sol afin de mieux appréhender les mécanismes qui sous-tendent la remédiation des sols alcalinisés.

Remerciements

Les travaux de recherche de cette étude ont été financés par le projet Urban Food^{Plus} (www.urbanfoodplus.org) dans le cadre de l'initiative Globe (BMBF, 031A242A), en tant que fonds de participation du Ministère Fédéral Allemand de l'Education et de la Recherche (BMBF) et du Ministère Fédéral de la Coopération Economique et du Développement (BMZ). Nous remercions les agriculteurs du site maraicher urbain de Kossodo et les Dr. Zacharia GNANKAMBARY, Mathias B. POUYA, Innocent D. KIBA pour la revue de ce papier.

Références bibliographiques

- ABROL I. P., YADAV J. S. P., MASSOUD F. I., 1988. Salt-Affected Soils and their Management, Soils Bulletin No. 39. FAO, Rome. 182 p.
- AHMAD S., GHAFOR A., AKHTAR M. E., KHAN M. Z., 2016. Implication of Gypsum Rates to Optimize Hydraulic Conductivity for Variable-Texture Saline-Sodic Soils Reclamation. *Land Degradation and Development*, 27 : 550-560.
- AHMAD S., GHAFOR A., QADIR M., AZIZ M. A., 2006. Amelioration of a Calcareous Saline-Sodic Soil by Gypsum Application and Different Crop Rotations. *International journal of agriculture & biology*, 8 (2) : 142-146.
- CHAGANTI N. V., CROHN M. D., ŠIMŮNEK J., 2015. Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline-sodic soil with moderate SAR reclaimed water. *Agricultural Water Management*, 158 : 255-265.
- CHEN L. & DICK W. A., 2011. Gypsum as an agricultural amendment: General use guidelines. *Bulletin*, 945 : 1-35.
- CHOWDHURY N., MARSCHNER P., BURNS R., 2011. Response of microbial activity and community structure to decreasing soil osmotic and matric potential. *Plant and Soil*, 344, (1) : 241-254.

- DAO J., 2017. Effects of irrigation water quality on soil properties and crops in urban gardens of Ouagadougou, Burkina Faso. Doktor der Agrarwissenschaften, Faculty of Organic Agricultural Sciences, Universität Kassel, Germany. 104 p.
- DAO J., LOMPO D. J., STENCHLY K., HAERING V., MARSCHNER B., BUERKERT A., 2019. Gypsum Amendment to Soil and Plants Affected by Sodic Alkaline Industrial Wastewater Irrigation in Urban Agriculture of Ouagadougou, Burkina Faso. *Water Air Soil Pollution*, 2019 : 230-282.
- DRECHSEL P., GRAEFE S., SONOU M., COFIE O. O., 2006. Informal Irrigation in Urban West Africa: An Overview. *International Water Management Institute. Research Report*, 102 : Colombo, Sri Lanka, 40 p.
- FAGERIA N. K., GHEYI H. R., MOREIRA A., 2011. Nutrient bioavailability in salt affected soils. *Journal of Plant Nutrition*, 34 (7) : 945-962.
- FATMA Z. M. A., 2011. The determinants of salinity tolerance in maize (*Zea mays* L.). Doctoraat in de Wiskunde en Natuurwetenschappen, Faculty of Mathematics and Natural science, University of Groningen, Egypt. 224 p.
- GRAVES S., PIEPHO H., SELZER L., DORAI-RAJ S., 2019. Package ‘ multcompView ’: Visualizations of Paired Comparisons. Version 0.1-8, 1-24 p.
- KAMEL H. G., H. NOUFAL E., FARID I., ABDEL-AZIZ S., ABBAS M., 2016. Alleviating Salinity and Sodicty by Adding Some Soil Amendments. *Journal of Soil Science and Agricultural Engineering, Mansoura University*, 7 (6) : 389-395.
- JESUS J. M., DANKO A. S., FIÚZA A., BORGES M. T., 2015. Phytoremediation of salt-affected soils: a review of processes, applicability, and the impact of climate change. *Environmental Science and Pollution Research*, 22 (9) : 1-15.
- KIBA D. I., ZONGO A. N., COMPAORE E., SEDOGO P. M., FROSSARD E., 2012. The diversity of fertilization practices affects soil and crop quality in urban vegetable sites of Burkina Faso. *European Journal of Agronomy*, 38 : 12-21.
- KUZNETSOVA A., BROCKHOFF P. B., CHRISTENSEN R. H. B., 2017. lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82 (13) : 1-26.
- LENTH R. V., BUERKNER P., HERVE M., LOVE J., RIEBL H., SINGMANN H., 2021. Package ‘ emmeans ’: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. Version 1.6.2-1, 87 p.
- MAHANTA K. K., KANSAL M. L., MISHRA G. C., 2015. Managing salt affected soils: Issues and strategies. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 4 (1) : 1-9.
- NAUMANN C. & BASSLER R., 1976. Methodenbuch: Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. Band III, In : « Handbuch Der Landwirtschaftlichen Versuchs-Und Untersuchungsmethodik », VDLUFA - Verlag, Darmstadt, Germany, p. 560-570.
- QADIR M. & OSTER J. D., 2004. Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Science of The Total Environment*, 323 (1) : 1-19.
- Qadir M., 2016. Reversing salt-induced land degradation requires integrated measures. *Water Economics and Policy*, 2 (1) : 1671001-8.
- R CORE TEAM, 2018. R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- RASOULI F., KIANI P. A., KARIMIAN N., 2013. Wheat yield and physico-chemical properties of a sodic soil from semi-arid area of Iran as affected by applied gypsum. *Geoderma*, 193-194 (2013) : 246-255.
- SOU Y. M., 2009. Recyclage des eaux usées en irrigation : potentiel fertilisant, risques sanitaires et impacts sur la qualité des sols. Docteur es sciences, chitectural et Construit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse. 162 p.

TURAN A. M., AŞIK, B. B., KATKAT V. A., ÇELİK H., 2011. The effects of soil-applied humic substances to the dry weight and mineral nutrient uptake of maize plants under soil-salinity conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 39 (1) : 171-177.

WRB I.W.G., 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106, Rome. 190 p.

XIE W., WU L., WANG J., ZHANG Y., OUYANG Z., 2017. Effect of Salinity on the Transformation of Wheat Straw and Microbial Communities in a Saline. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48 (12) : 1455-1461.