



Original Paper

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

Effets de différentes doses de phosphate naturel sur la réduction de la toxicité ferreuse des sols du bas-fond de Niaouli au sud Bénin

Richard N. HODOMIHOU^{*}, Euloge K. AGBOSSOU, Guillaume L. AMADJI
et Hassan B. NACRAO

Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi / Bénin.

^{*}Auteur correspondant, E-mail : richardia2004@yahoo.fr

RESUME

Pour atténuer la toxicité ferreuse des sols de bas-fond, l'effet de différentes doses du phosphate naturel a été étudié. Quatre niveaux de phosphate naturel (0, 60, 120 et 180 kg de P à l'hectare) ont été appliqués selon un dispositif de blocs complètement aléatoires à quatre répétitions. Le chlorure de potassium (50 kg de K à l'hectare) et l'urée (80 kg de N à l'hectare) ont été combinés à ces doses du phosphate naturel afin d'éliminer l'effet dû à la carence en potassium et en azote. Les résultats d'analyse de variances portés sur les données d'analyse d'échantillons de sols prélevés dans les casiers rizicoles à la fin de l'expérimentation, ont révélé des différences significatives ($P < 0,05$) à très hautement significatives ($P < 0,001$) entre les quatre niveaux de phosphate naturel appliqués (traitements). Les traitements où le phosphate est présent (60, 120 et 180 kg de P à l'hectare) ont baissé par rapport au témoin, les paramètres chimiques du sol tels que : le potentiel d'oxydoréduction (soit respectivement 69, 69,25 et 77 mV contre 107,5 mV pour le témoin) et la teneur en fer libre (soit respectivement 586,5, 514,87 et 568,59 ppm contre 801,36 ppm pour le témoin). En outre, les traitements phosphate ont amélioré les rendements en paille sèche (soit respectivement 1925, 2462 et 1861 kg/ha contre 1107 kg/ha pour le témoin) et en grains paddy (soit respectivement 1059, 1596 et 1031 kg/ha contre 759 kg/ha pour le témoin). La dose du phosphate naturel qui a le plus amélioré les paramètres chimiques du sol et du rendement est la dose 120 kg de P à l'hectare. Ainsi cette dose pourrait être recommandée en riziculture irriguée de bas-fond où la toxicité ferreuse est présente (900 à 1000 ppm de fer libre) pour le développement agricole en Afrique subsaharienne.

© 2011 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Afrique subsaharienne, riziculture irriguée, toxicité ferreuse, phosphate naturel.

INTRODUCTION

Dans les pays de l'Afrique subsaharienne, la toxicité chimique des sols de bas-fonds constitue une contrainte réelle à la durabilité de la mise en valeur des bas-fonds (Delarue, 2007). Le fer, l'élément le plus concentré dans les sols des plateaux (Audebert, 2002) en particulier les sols

ferralitiques et ferrugineux tropicaux, est entraîné sous forme de fer ferrique (Fe^{3+}) dans le bas-fond, soit par suintement à travers le sol (écoulement divergent) soit par ruissellement et érosion des pentes supérieures vers le fond de la vallée où le fer ferrique rencontre des conditions d'engorgement en eau favorisant sa réduction en fer ferreux (Fe^{2+}). Il peut aussi

© 2011 International Formulae Group. All rights reserved.

DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v5i6.9>

provenir de la mise en solution in situ dans le bas-fond (Diatta et al., 1998 ; Kirk, 2004). Au delà d'une concentration de l'ordre de 300 ppm, il provoque des toxicités ferreuses sur le riz (*yellowing, bronzing*), malgré la capacité de cette plante à créer une réoxydation partielle autour des racines, par des transferts d'oxygène en provenance des parties aériennes (Becker et Asch, 2005 ; Audebert, 2006a). C'est un trouble nutritionnel associé à de fortes concentrations de fer dans la solution du sol (Fageria et al., 2008). Ce qui entraîne des pertes de rendement allant de 16 à 78% ou en moyenne de l'ordre de 54% (Chérif et al., 2006, 2009 ; Audebert and Fofana, 2009).

Pour Kirk (2004), les manifestations de la toxicité ferreuse peuvent être associées à des déficiences en phosphore, en zinc ainsi qu'à l'acidité et la baisse de la fertilité chimique du sol. Pour y remédier, Audebert (2002) a proposé quelques options de pratiques culturales tels que le blocage du mouvement du fer provenant des plateaux en drainant les champs pour les débarrasser des excédents de fer, en convertissant le fer ferreux en fer ferrique, en minimisant l'absorption de fer par la plante ou trouver des variétés de riz tolérantes aux fortes concentrations de fer dans le sol. Ces techniques auxquelles s'ajoute l'apport de fertilisant, peuvent être appliquées afin d'atténuer la toxicité ferreuse des bas-fonds et corriger le déséquilibre nutritionnel de la solution du sol (Audebert, 2006b ; Ethan et al., 2011). Il est connu depuis longtemps en milieu acide, et sur les sols pauvres en matière organique, que le fer se combine à l'acide phosphorique pour donner des phosphates ferriques insolubles et non assimilables (Diatta et Sahrawat, 2006) ; ainsi la toxicité ferreuse est minimisée. En effet, ces auteurs ont constaté que l'application de NPKZn hydrosolubles a minimisé significativement l'effet de la toxicité ferreuse sur le rendement du riz. Considérant que les phosphates hydrosoluble comme le superphosphate simple (SSP), le triple superphosphate (TSP) et le phosphate di-ammonique (DAP), sont

des engrais industriels qui nécessitent des investissements onéreux et que leurs applications régulières ont des incidences sur l'environnement (Kuyvenhoven, 2004) ; il importe de trouver une autre alternative de gestion de la toxicité ferreuse en riziculture de bas-fond. Selon Zapata et Roy (2004), en se basant sur le prix de revient de l'unité de phosphore, le phosphate naturel local est habituellement le moins onéreux et son application directe peut être plus efficace que des engrais phosphatés solubles en terme de récupération de phosphore par les plantes dans certaines conditions. C'est dans cette optique que le présent travail se propose d'étudier l'effet des doses croissantes du phosphate naturel dans les processus d'atténuation de la toxicité ferreuse pour l'amélioration des rendements du riz Bouaké 189 dans le bas-fond de Niaouli.

Les objectifs spécifiques de l'étude sont d'évaluer les impacts du phosphate naturel sur les paramètres chimiques notamment le pH, le potentiel d'oxydoréduction, les teneurs en fer libre et total, les teneurs en phosphore assimilable et total, les teneurs en carbone organique et azote total des sols du bas-fond de Niaouli et sur les rendements en paille et en grains paddy du riz Bouaké 189, et de déterminer la dose du phosphate naturel qui réduit mieux cette toxicité ferreuse.

MATERIEL ET METHODES

Le village Niaouli est situé à la Latitude 6°44' Nord et Longitude 2°08'25'' Est, à environ 56 kilomètres de Cotonou. Le bas-fond ayant fait l'objet de notre étude est localisé sur les franges hydromorphes du lit de la rivière Ava.

La zone d'étude est située sur le plateau d'Allada qui est l'un des plateaux de terre de barre du Sud-Bénin qui font suite à la plaine côtière par un talus régulier. Ainsi les terres de barre appartenant à la classe des sols ferrallitiques sont les seules rencontrées sur ce plateau. Dans le bas-fond on rencontre des

sols hydromorphes dont les caractéristiques chimiques sont données dans le Tableau 1.

D'altitude moyenne 100 m au dessus du niveau de la mer, cette zone connaît un climat subéquatorial caractérisé par un régime bimodal avec une pluviosité moyenne annuelle de 1120 mm.

La végétation est une savane arborée. Toutefois, il existe une forêt dense naturelle sur les versants du bassin de la rivière Ava et qui fait partie intégrante du domaine du Centre de Recherches Agricoles (CRA- SUD). Dans cette forêt naturelle, on rencontre encore les arbres tels que *Diospyros mespiliformis*, *Lonchocarpus sericeus*, *Mimusops andongensis*, *Spondias monbin*, *Ceiba pentandra*, *Azelia africana*, *Dialium guineense*, *Antiaris toxicaria*, *Anogeisus leiocarpa*, *Celtis zenkeri*, *Celtis philippensis* (Akoegninou et al., 2006).

Le dispositif expérimental est un bloc complètement aléatoire à quatre traitements et quatre répétitions. Les traitements ont consisté en l'apport de différents niveaux de phosphate naturel du Togo à savoir :

- T0 : 0 kg de P /ha + 50 kg de K /ha + 80 kg de N /ha (Témoin)
- T1 : 60 kg de P /ha + 50 kg de K /ha + 80 kg de N /ha
- T2 : 120 kg de P /ha + 50 kg de K /ha + 80 kg de N /ha
- T3 : 180 kg de P /ha + 50 kg de K /ha + 80 kg de N /ha.

L'urée a été apportée sous forme de fumure de couverture afin de faciliter le développement de la plante. Les valeurs fertilisantes des différents types d'engrais apportés sont : le phosphate naturel 36,8% de P_2O_5 (soit 84,3% de P), le KCl 60% de K_2O (soit 72% de K) et l'urée 46% de N.

Les parcelles élémentaires sont représentées par des casiers rizicoles de 4m x 3 m (soit 12 m²) entourés par des diguettes où le riz a été repiqué à raison de deux plants par poquet, à des écartements de 20 cm x 20 cm soit une densité de 500000 plants à l'hectare. Au total, l'essai a comporté seize casiers élémentaires, lesquels sont séparés les uns des

autres par des allées de 60 cm. L'ensemble est entouré par des digues (Figure 1). Etant donné qu'il s'agit d'une riziculture de bas-fond, les digues permettent de retenir la lame d'eau au niveau de la parcelle expérimentale et les diguettes au niveau des casiers rizicoles.

Les doses d'engrais constituant les différents traitements sont consignées dans le Tableau 2.

La variété de riz BOUAKE 189 provenant d'Africa Rice/Bénin ayant pour cycle de développement 126 jours a été semée. C'est une variété de riz irrigué de bas-fond sensible à la toxicité ferreuse. Au début de l'essai, nous avons procédé à un curage du chenal principal du bas-fond sur toute sa longueur. Ceci a permis le retrait des eaux du bas-fond au sens strict.

L'endroit ayant abrité l'essai est proche de la zone médiane du bas-fond. Après délimitation nous avons procédé au défrichage, au labour et à la confection des casiers rizicoles. Afin d'éviter des irrégularités dans la lame d'eau, nous avons procédé au planage manuel en cassant les mottes de terre avec une petite houe. Les casiers ont été faits une semaine avant le repiquage car ils doivent recevoir suivant les traitements les différentes doses d'engrais. Le riz a été ensuite repiqué le 30 Novembre 2008.

Les différentes doses du phosphate naturel et le KCl ont été entièrement appliquées comme fumure de fond par contre, l'urée a été fractionné 1/3 de la dose (soit 69,6 g/casier) au repiquage, 1/3 au tallage et 1/3 à l'initiation paniculaire.

Les engrais ont été enfouis dans le sol sur les lignes de repiquage trois jours avant le repiquage. Les deux dernières doses de l'urée ont été épandues à la volée après avoir vidé la lame d'eau des casiers rizicoles. Au lendemain de cette opération, les casiers sont à nouveau remplis de la lame d'eau.

Avant et à la fin de l'expérimentation, des échantillons composites de sols ont été confectionnés à partir des prélèvements (en diagonales croisées) réalisés à l'aide de la

Tableau 1 : Caractéristiques chimiques du sol du site de l'étude dans la profondeur 0 – 20 cm avant l'installation de l'essai.

Paramètres	Valeurs moyennes
pH (eau)	5,15
pH (KCl)	4,28
Potentiel d'oxydoréduction : Eh (mV)	110
Carbone Organique : C (%)	1,43
Azote Total : N (%)	0,065
C/N	22,0
Fer Libre (ppm)	944,61
Fer Total (ppm)	5797,36
Phosphore assimilable Bray-1 P (ppm)	17,0
Phosphore Total (ppm)	470,25

pH = potentiel hydrogène, KCl = Chlorure de potassium, mV = millivolt, ppm = partie par million

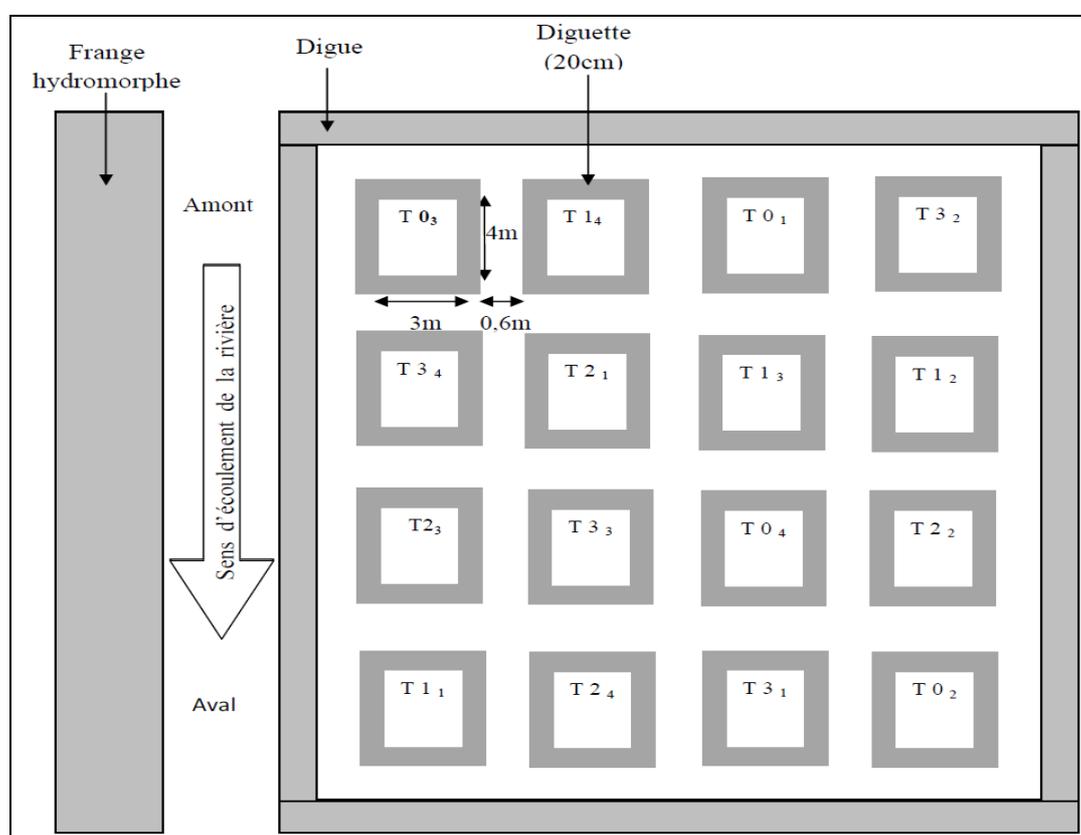


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental.

Ti = traitement et j = numéro de la répétition ; m = mètre.

tarière dans l'horizon 0 – 20 cm du site devant abriter l'essai et dans chaque casier rizicole.

Les échantillons composites de sol prélevés dans les casiers rizicoles à la fin de l'expérimentation ont été soumis à l'analyse de laboratoire conformément aux méthodes proposées par Mathieu et Pieltain (2003).

Le pH et le potentiel d'oxydoréduction in situ ont été déterminés par la méthode potentiométrique qui permet de mesurer le potentiel d'une électrode indicatrice sensible à la solution du sol, par rapport à une électrode de référence. Elle consiste à rechercher la concentration en ions d'une solution inconnue en mesurant la différence électrique entre cette solution et une solution où la concentration en ions est connue (étalon ou tampon).

Le taux de carbone organique a été déterminé par la méthode d'Anne modifiée qui consiste à oxyder la matière organique par du bichromate de potassium en milieu acide (acide sulfurique). Le bichromate étant en excès, la quantité réduite est proportionnelle à la teneur en carbone organique. Les ions chromiques (Cr^{3+}) sont dosés par colorimétrie ou spectrophotométrie.

Le taux d'azote total a été déterminé par la méthode de Kjeldhal qui consiste à l'attaque (minéralisation) du sol par l'acide sulfurique (H_2SO_4) concentré en présence d'un catalyseur (sulfate de potassium + sulfate cuivre + sélénium), puis après neutralisation par la soude et passage en milieu alcalin, distillation de l'ammoniac (NH_3) et dosage par titrimétrie.

Le fer libre a été extrait par de l'acétate d'ammonium (1N à pH=7) et a été dosé au spectromètre à absorption atomique.

Le fer total a été extrait par de l'eau régale (mélange d'acide chlorhydrique 2/3 et d'acide nitrique 1/3) puis a été dosé au spectromètre à absorption atomique.

Le phosphore total a été déterminé par la méthode de Dabin modifiée qui consiste à une calcination à 550 °C du sol puis attaque avec de l'acide nitrique concentré et reprise du

culot par de l'acide sulfurique (1N). L'objectif recherché est la mise sous forme de pyrophosphate de toutes les formes de phosphore. Avec deux reprises à l'acide sulfurique, on obtient l'hydrolyse du pyrophosphate en phosphate qui est la seule forme qui réagit avec le molybdate d'ammonium. Enfin le dosage a été effectué au spectrophotomètre à 860 nm.

Le phosphore assimilable par la méthode Bray-1 qui consiste à l'extraction du phosphore assimilable en milieu acide (acide chlorhydrique) par le fluorure d'ammonium, puis réaction avec le molybdate d'ammonium et dosage au spectrophotomètre à 660 nm.

Les données de pH, du potentiel d'oxydoréduction, de teneurs en fer libre et total, de teneurs en phosphore assimilable et total, de teneurs en carbone organique et azote total et de rendements en grains paddy et paille ont été soumises à une analyse de variance à un facteur. Le test de Student-Newman-Keuls (SNK) a permis le classement des traitements au seuil de 5%. Le logiciel SAS version 9.2 a été utilisé pour la réalisation de ces analyses.

RESULTATS

Effet des différentes doses de P sur l'acidité et le potentiel d'oxydoréduction du sol

Des résultats de l'analyse de variance, il ressort qu'aucune différence significative ($P > 0,05$) n'existe entre les traitements pour les différentes valeurs du pH mesurées (Tableau 3). Les valeurs moyennes du pH (eau) varient de 5,20 à 5,31 et celles du pH (KCl) varient de 4,31 à 4,48.

Le sol du bas-fond étudié présente un potentiel d'oxydoréduction (Eh) de l'ordre de 110 mV avant l'expérimentation (Tableau 2). A la fin de l'expérimentation, l'Eh moyen a varié de 69,0 à 107,5 mV suivant les traitements. L'analyse de variance révèle un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) entre le témoin sans P et les différents traitements ayant reçu le P naturel (Tableau 3). En effet, on note une réduction respective de 35,8 ; 35,6 et 28,4% par rapport au témoin.

Effet des différentes doses de P sur le fer libre

Les résultats de l'analyse de variance ont révélé un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) entre le témoin et les traitements ayant reçu le P naturel (Tableau 4), ce qui confirme les résultats d'oxydoréduction obtenus. Les traitements phosphate ont baissé au même titre significativement la teneur du sol en fer libre par rapport au témoin. Le traitement T2 se révèle comme le plus expressif en réduisant le plus la teneur en fer libre dans la solution du sol.

Effet des différentes doses de P sur le fer total

L'analyse de variance a révélé qu'il n'y a pas de différence significative entre les différents traitements ($P > 0,05$). Ceci traduit une homogénéité de la parcelle expérimentale en matière de fer total, bien que les teneurs en fer libre ne soient pas les mêmes selon les traitements.

Effet des différentes doses de P sur le phosphore total et le phosphore assimilable

La Figure 2 présente la variation de la teneur en phosphore total du sol en fonction de la dose du phosphate naturel appliqué. De l'analyse de cette figure, il ressort que la teneur en phosphore total du sol, évolue proportionnellement avec les doses du phosphate naturel appliqué. La probabilité de l'analyse régressive ($p < 0,001$) révèle qu'il y a une corrélation étroite très hautement significative entre ces deux paramètres du point de vue statistique. La constante $c = 467,29$ ppm qui est l'ordonnée à l'origine, représente le statut initial en phosphore total du sol du bas-fond. L'excédent observé à chaque dose est strictement fonction de la quantité de phosphate naturel appliqué. L'analyse de variance a révélé un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) entre les traitements.

La Figure 3 présente le graphe traduisant l'évolution de la teneur en phosphore assimilable du sol en fonction de la dose du phosphate naturel appliqué. De l'analyse de cette figure, il ressort que la

teneur en phosphore assimilable du sol, est proportionnelle à la dose du phosphate naturel appliqué. Mais ici, cette proportionnalité est traduite par une régression multiple non linéaire dont la courbe de tendance est représentée par l'équation polynomiale d'ordre 2 : $y = -0,0016x^2 + 06999x + 16,474$; où $y =$ teneur en phosphore assimilable (en ppm) du sol et $x =$ dose du phosphate naturel (en kg/ha). La probabilité de l'analyse régressive ($p < 0,001$) révèle qu'il y a une corrélation étroite très hautement significative entre ces deux paramètres.

Le carbone organique et l'azote total

L'analyse de variance a révélé un effet non significatif ($P > 0,05$) en ce qui concerne le carbone organique. En revanche, les traitements T0, T2 et T3 ont eu un effet hautement significatif ($P < 0,01$) sur la teneur du sol en azote total (Tableau 5). Ainsi, on en déduit que l'apport du phosphate naturel n'a pas influencé le taux de carbone organique des sols, mais a influencé la minéralisation de la matière organique, ce qui a contribué à l'amélioration des teneurs en azote total. Signalons qu'un effet dépressif a été noté sur le taux d'azote total au niveau du traitement T3 (dose 180 kg de P à l'hectare) comparativement au traitement T2 (120 kg de P à l'hectare).

Rendement en paille sèche du riz

L'analyse de variances a révélé une différence très hautement significative ($P < 0,001$) entre les traitements. Le test de SNK distingue trois groupes de traitements: (T0), (T1 et T3) et (T2) (Tableau 6). Les traitements T1, T3 et T2 ont engendré respectivement une augmentation en paille sèche de 73,93, 68,13 et 122,4% par rapport au témoin. Ainsi, l'application du phosphate naturel a amélioré les rendements en paille du riz, en atténuant l'effet de la toxicité ferreuse ; le traitement T2, s'étant révélé comme le plus expressif. Mais signalons que le traitement T3 (180 kg de P à l'hectare) a induit un effet dépressif comparativement à T2.

Rendement en grains paddy

L'analyse de variances a révélé une différence très hautement significative ($P < 0,001$) entre les traitements (Tableau 6). Le test de SNK distingue deux groupes de traitements: (To, T1 et T3) et (T2). Quand on considère les moyennes, on constate que les traitements T1, T3 et T2 ont induit respectivement une augmentation de 39,53 ; 35,9 et 110,43% par rapport au témoin. Ainsi, le traitement T2 se révèle comme le plus expressif.

Poids de 1000 grains paddy

L'analyse de variances a révélé une différence très hautement significative ($P < 0,001$) entre les traitements en ce qui concerne le poids de 1000 grains paddy (Tableau 6). Le test de SNK distingue trois groupes de traitements: (To), (T1) et (T2 et T3). Les traitements T1, T2 et T3 ont induit respectivement une augmentation de 11,43 ,

24,56 et 21,73% par rapport au témoin. Il ressort de cette analyse que les traitements T2 et T3 se sont révélés comme les plus expressifs.

Pourcentage de grains vides

L'analyse de variances ayant porté sur les pourcentages des grains vides a révélé une différence très hautement significative ($P < 0,001$) entre les traitements. Selon les résultats du test de SNK (Tableau 6), on distingue quatre groupes de traitements par ordre croissant de réduction du taux de grains vides: (To), (T1), (T3) et (T2). Les traitements T1, T3 et T2 ont induit respectivement une réduction de 15,6 , 17,625 et 21,125% par rapport au témoin. Il ressort que le traitement T2 a été le plus expressif en atténuant mieux l'impact de la toxicité ferreuse sur les grains. Toutefois, tous les traitements phosphate naturel ont eu des effets positifs sur ce paramètre de rendement.

Tableau 2 : Doses d'engrais apportées par casier rizicole de 12 m².

Traitement	Phosphate naturel (g)	KCl (g)	Urée (g)
T0	0	83,34	208,7
T1	85,44	83,34	208,7
T2	170,88	83,34	208,7
T3	256,32	83,34	208,7

g = gramme

Tableau 3 : Effet de différentes doses de P sur l'acidité et le potentiel d'oxydoréduction des sols de bas-fond.

Traitement	pH (eau)	pH (KCl)	Potentiel d'oxydoréduction Eh (mV)
T0	5,20 ±0,03 A	4,31 ±0,04 A	107,50±1,70 A
T1	5,30 ±0,04 A	4,46 ±0,05 A	69,00 ±1,68 B
T2	5,31 ±0,03 A	4,42 ±0,00 A	69,25 ±2,17 B
T3	5,25 ±0,04 A	4,48 ±0,05 A	77,00 ±3,42 B
Probabilité	0,166 ns	0,052 ns	<0,0001 ***
CV (%)	1,33	1,24	5,83

*** : Très hautement significatif ; ns : Non significatif.

Les valeurs marquées des mêmes lettres (A, B) et situées dans la même colonne ne sont pas significativement différentes les unes des autres au seuil de 5% selon le test de Student-Newman-Keuls.

Tableau 4 : Teneurs moyennes en fer libre et total, des sols sous différents traitements à la récolte.

Traitement	Teneur en fer libre (ppm)	Teneur en fer total (ppm)
T0	801,36 ± 29,24 A	6065,94 ± 225,30 A
T1	586,50 ± 29,24 B	5976,42 ± 310,13 A
T2	514,87 ± 29,24 B	5976,42 ± 231,16 A
T3	568,59 ± 34,29 B	5886,89 ± 171,43 A
Probabilité	0,0001 ***	0,962 ns
CV (%)	9,90	8,02

*** : Très hautement significatif ; ns : Non significatif ; ppm = partie par million.

Les valeurs marquées des mêmes lettres et situées dans la même colonne ne sont pas significativement différentes les unes des autres au seuil de 5% selon le test de Student-Newman-Keuls.

Tableau 5 : Taux moyens de carbone organique et d'azote total des sols sous différents traitements à la récolte.

Traitement	Carbone Organique C (%)	Azote Total N (%)
T0	1,40 ± 0,10 A	0,07 ± 0,00 C
T1	1,31 ± 0,08 A	0,079 ± 0,00 BC
T2	1,46 ± 0,09 A	0,09 ± 0,00 A
T3	1,49 ± 0,035 A	0,085 ± 0,00 B
Probabilité	0,4547 ns	0,002 **
CV (%)	11,61	5,44

** : Hautement significatif ; ns : Non significatif ; % : Pourcentage ; CV = Coefficient de variation.

Les valeurs marquées des mêmes lettres et situées dans la même colonne ne sont pas significativement différentes les unes des autres au seuil de 5% selon le test de Student-Newman-Keuls.

Tableau 6 : Rendements moyens en paille sèche et grains paddy, poids moyens de 1000 grains et pourcentage de grains vides.

Traitement	Rdt paille sèche (kg/ha)	Rdt grains paddy (kg/ha)	Poids de 1000 grains paddy	% Grains vides
T0	1107,0 ± 89,08 C	758,6 ± 100,03 B	21,425 ± 0,65 C	25,750 ± 2,03 A
T1	1925,4 ± 111,67 B	1058,5 ± 39,92 B	23,874 ± 0,54 B	10,150 ± 0,278 B
T2	2462,0 ± 121,42 A	1596,3 ± 123,65 A	26,686 ± 0,32 A	4,625 ± 0,34 D
T3	1861,2 ± 183,14 B	1030,9 ± 38,92 B	26,081 ± 0,48 A	8,125 ± 0,75 C
Probabilité	<0,0001 ***	<0,0001 ***	<0,0001 ***	<0,0001 ***
CV (%)	14,25	15,17	4,19	6,46

Rdt = Rendement ; kg/ha = kilogramme par hectare.

Les valeurs marquées des mêmes lettres et situées dans la même colonne ne sont pas significativement différentes les unes des autres au seuil de 5% selon le test de Student-Newman-Keuls.

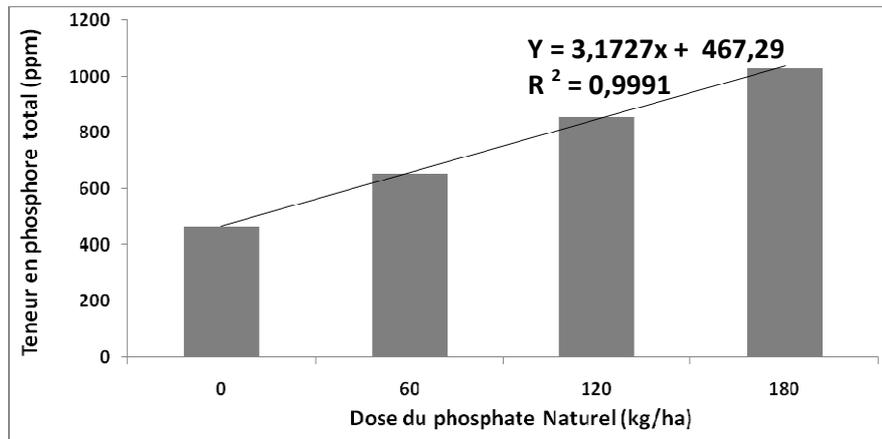


Figure 2: Courbe de régression traduisant la teneur en phosphore total du sol en fonction de la dose du phosphate naturel appliqué.

R^2 = coefficient de détermination ; Y = teneur en phosphore total du sol.

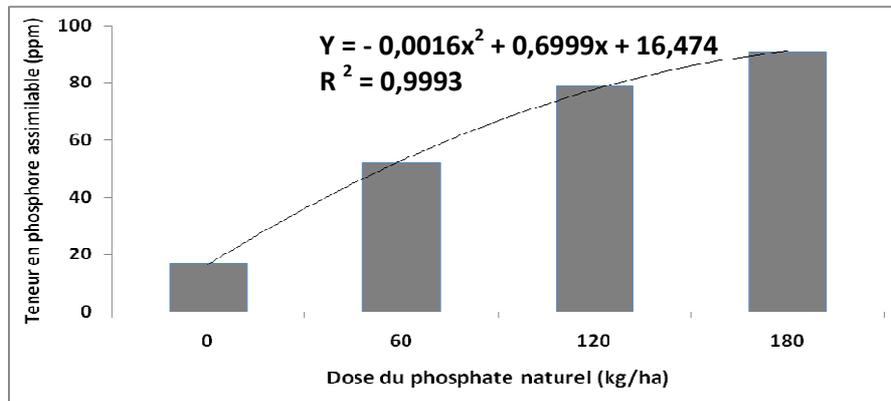


Figure 3: Courbe de régression traduisant la teneur en phosphore assimilable du sol en fonction de la dose du phosphate naturel appliqué.

R^2 = coefficient de détermination ; Y = teneur en phosphore assimilable du sol.

DISCUSSION

Les valeurs de pH (eau) indiquent que les sols sont fortement acides d'après les normes d'interprétation du pH (eau) du sol proposées par Mathieu et Pieltain (2003). Ces valeurs de pH sont conformes à celles trouvées dans certains bas-fonds de la Guinée, la Côte d'Ivoire et du Nigéria par Audebert (2006a) où le pH (eau) a varié entre 5,0 et 5,4. Les doses de phosphate naturel n'ont pas amélioré significativement le pH du sol. Ce

qui est contraire à l'observation faite par Debrah (2000) et Zapata (2002). En effet, ces auteurs ont constaté que le phosphate naturel du Mali améliore l'acidité des sols ; ceci pourrait s'expliquer par le fait que le phosphate naturel du Mali est plus soluble que celui du Togo (FAO, 2001).

Les valeurs du potentiel d'oxydoréduction (Eh) témoignent que les sols du bas-fond ont subi une réduction moyenne par référence à l'échelle de

qualification de l'état de réduction des sols proposé par Vizier (1990). Les traitements phosphate naturel ont baissé l'Eh (Tableau 3); ce qui est avantageuse pour le développement des plants du riz. En effet selon Ethan et al. (2011), les bons rendements obtenus en rizière inondée sont dus à un Eh bas.

Les traitements phosphate ont eu des effets positifs sur la toxicité ferreuse en baissant la teneur en fer libre (Tableau 4). Ceci s'explique par le fait que l'acide phosphorique issu du phosphate naturel, se serait combiné à une partie du fer libre pour donner des phosphates ferriques insolubles (Diatta et Sahrawat, 2006). Mais ces effets demeurent encore insuffisants ; en effet selon Audebert (2006c), au delà d'une concentration de l'ordre de 300 ppm de Fe^{2+} , les symptômes de toxicité ferreuse apparaissent chez le riz. C'est d'ailleurs pour cette raison que les symptômes de toxicité ferreuse sur le riz ont été notés, mais parfois tardivement sur ces traitements.

Les teneurs en fer total ne sont pas significativement différentes. Cela s'explique par le fait que le milieu étant fortement acide, le complexe ferri-phosphorique formé par combinaison d'une partie du fer libre et du phosphate, est demeuré dans la solution du sol en place et a été mis en évidence lors du dosage du fer total. Ces valeurs de fer total obtenues à l'issue de cette expérimentation, sont conformes à celles observées par Narteh et Sahrawat (2006) dans 15 bas-fonds rizicoles ouest africains. En effet, ils ont obtenu des teneurs de fer total variant de 1597 à 71025 ppm.

Une corrélation étroite très hautement significative a été observée entre la teneur en phosphore total du sol et la dose du phosphate naturel appliqué. Ce qui s'explique par le fait que les pertes par lixiviation et drainage sont faibles. Ce constat corrobore ceux de Hedley et Bolan (2003), qui ont recommandé l'utilisation des phosphates naturels, selon leur réactivité dans les sols ayant un pH inférieur ou égal à 5,5. Tel est le cas du sol du bas-fond étudié. Outre les considérations économiques

moins onéreuses de l'apport du phosphate naturel (Zapata et Roy, 2004), il induit des conditions défavorables à la toxicité ferreuse par la libération du phosphore assimilable. Cette libération est régie par une corrélation à tendance polynomiale (Figure 3). Ce constat est conforme à celui fait par Habib et al. (1998). Ainsi, il en découle que les faibles doses de phosphate naturel rendent mieux le phosphore disponible. Ceci s'expliquerait par les conditions chimiques du milieu, notamment le pH bas (moins de 5,5) (Zapata et Roy, 2004). Il se dégage alors de cette analyse que la dose 120 kg de P à l'hectare (traitement T2) est la dose du phosphate naturel qui a le plus amélioré le statut en phosphore disponible du sol.

L'apport du phosphate naturel n'a pas influencé significativement le taux de carbone organique des sols, mais a influencé la minéralisation de la matière organique, ce qui a contribué à l'amélioration des teneurs en azote total (Tableau 5). Ce constat corrobore celui fait par (Kotchi, 2002). En effet cet auteur a constaté que dans les sols fortement acides, les engrais phosphatés agissent sur les teneurs d'azote dans le sol en favorisant la minéralisation de la matière organique par une stimulation de l'activité de certains microorganismes pour la formation des nitrates.

Les traitements phosphate naturel ont amélioré les rendements en paille sèche et en grains paddy (Tableau 6). Ces résultats corroborent ceux trouvés par Diatta et al. (1998, 2006), qui ont rapporté que l'application des nutriments réduit les effets de toxicité ferreuse, améliore le tallage et augmente par conséquence les rendements en paille et en grains paddy. L'effet dépressif observé sur le rendement en paille sèche au niveau du traitement T3 (180 Kg P à l'hectare), corrobore les observations de Koné et al. (2009) au Nigéria. En effet, ces auteurs dans leur travail en zone de forêt au Nigéria, ont constaté une réponse croissante du riz pluvial aux doses progressives de phosphate naturel ; laquelle réponse a connu un effet

dépressif à la dose 150 kg P à l'hectare. La quantification de ces effets permet de faire le classement suivant : $T_0 < T_1 < T_3 < T_2$. Ceci indique alors que le phosphate naturel appliqué à 120 kg P à l'hectare se révèle comme la dose efficiente.

Les pourcentages en grains vides ont été réduits au niveau des traitements phosphate comparativement au témoin (Tableau 6). Ce résultat confirme les observations d'Audebert (2006c), qui a constaté une réduction du taux de stérilité des panicules sur des parcelles fertilisées par rapport aux parcelles non fertilisées dans des bas-fonds affectés de la toxicité ferreuse. Selon Audebert (2006b), la stérilité des panicules est liée à une défaillance de la photosynthèse due en particulier à l'accumulation des polyphénols oxydés, entraînant le « bronzing » ou « yellowing » du riz.

Conclusion

À l'issue de l'étude des impacts des différentes doses de phosphate naturel sur les caractéristiques chimiques du sol, il ressort que les traitements à base du phosphate naturel ont eu des effets significatifs sur le potentiel d'oxydoréduction (Eh), la teneur en fer libre, le phosphore assimilable, le phosphore total et l'azote total. Les doses apportées permettent de réduire la toxicité ferreuse sur la production du riz dans le bas-fond rizicole de Niaouli. On peut donc recommander l'utilisation de 120 kg de phosphate naturel par hectare pour atténuer considérablement la toxicité ferreuse du bas-fond, car cette dose s'est révélée la plus efficiente.

REMERCIEMENTS

Nous remercions très sincèrement les Partenaires au développement des Pays-Bas, qui ont financé entièrement cette étude par l'entremise du Projet NPT/145 basé à la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi (Bénin).

REFERENCES

- Audebert A. 2002. *Diagnostic du Risque et Approches de Gestion de la Toxicité Ferreuse dans les bas-fonds Rizicoles*. CIRAD-CA UPR Rizicultures, TA 70/01 : 34398 Montpellier cedex 5, France.
- Audebert A. 2006a. Diagnostic du risque et approche de gestion de la toxicité ferreuse dans les bas-fonds rizicoles. In *Toxicité Ferreuse dans les Systèmes à base riz d'Afrique de l'Ouest*, Audebert A, Narteh LT, Kiepe P, Millar D, Beks B (Eds.). Centre du riz pour l'Afrique (ADRAO) Cotonou, Bénin. Cirad-CA UPR Rizicultures : France Montpellier ; 6-17.
- Audebert A. 2006b. La toxicité ferreuse. Les conditions environnementales et les symptômes.. In *Toxicité Ferreuse dans les Systèmes à Base Riz d'Afrique de l'Ouest*, Audebert A, Narteh LT, Kiepe P, Millar D, Beks B (Eds.). Centre du riz pour l'Afrique (ADRAO) Cotonou, Bénin. Cirad-CA UPR Rizicultures : France Montpellier ; 18-34.
- Audebert A. 2006c. Ecart de rendement du riz dû à la toxicité ferreuse en Afrique de l'ouest. In *Toxicité Ferreuse dans les Systèmes à Base Riz d'Afrique de l'Ouest*, Audebert A, Narteh LT, Kiepe P, Millar D, Beks B (Eds.). Centre du riz pour l'Afrique (ADRAO) Cotonou, Bénin. Cirad-CA UPR Rizicultures : France Montpellier ; 48-67.
- Audebert A, Fofana M. 2009. Rice Yield gap due to iron toxicity in West Africa. *Journal of Agronomy and Crop Science*, **195**: 66-76.
- Baize D. 2000. *Guide des Analyses en Pédologie* (2ème édition revue et augmentée). INRA : Paris ; 257p.
- Becker M, Asch F. 2005. Iron toxicity in rice-condition and management concepts. *J. Plant Nutri. Soil Sci.*, **168**: 558-573.
- Chérif M, Audebert A, Fofana M, Zouzou M. 2009. Evaluation of Iron Toxicity on

- Lowland Irrigated Rice in West Africa. *Tropicultura*, **27**(2): 88-92.
- Chérif M, Fofana M, Audebert A, Zouzou M. 2006. Quelques aspects de l'importance de la toxicité ferreuse en Afrique de l'ouest. In *Toxicité Ferreuse dans les Systèmes à Base Riz d'Afrique de l'Ouest*, Audebert A, Narteh LT, Kiepe P, Millar D, Beks B (Eds). Centre du riz pour l'Afrique (ADRAO) : Cotonou, Bénin ; 157 - 166.
- Chien SH, Friesen DK. 2000. Phosphate fertilizers and management for sustainable crop production in tropical acid soils. In *Management and Conservation of Tropical Acid Soils for Sustainable Crop Production*. IAEA-TECDOC-1159: Vienna; 73-89.
- Debrah SK. 2000. La place du phosphore naturel de Tilemsi dans l'initiative pour la fertilité des sols au Mali. IFAD-International Fund for Agricultural Development Afrique, Togo, 20 p.
- Delarue, J. 2007. Modélisation des impacts des projets d'aménagement de bas-fonds. In « Mise au point d'une méthode d'évaluation systémique d'impact des projets de développement agricole sur le revenu des producteurs. Etude de cas en Région KPELE (République de Guinée) ». Thèse de Doctorat à l'Ecole Doctorale ABIES, Agro Paris Tech, 367 – 466.
- Diatta S, Audebert A, Sahrawat KL, Traoré S. 1998. Lutte Contre la Toxicité Ferreuse dans les Bas-fonds. Acquis de l'ADRAO dans la zone des savanes en Afrique de l'Ouest. Aménagement et mise en valeur des bas-fonds au Mali, Sikasso. CIRAD-CA : 363-371.
- Diatta S, Sahrawat LK. 2006. La toxicité ferreuse du riz en Afrique de l'ouest. criblage de variétés tolérantes et rôle de N, P, K et Zn. In *Toxicité Ferreuse dans les Systèmes à Base Riz d'Afrique de l'Ouest*, Audebert A, Narteh LT, Kiepe P, Millar D, Beks B (Eds). Centre du Riz pour l'Afrique (ADRAO) : Cotonou, Bénin ; 82 -89.
- Dobermann A, Fairhurst T. 2000. Rice Nutrient disorders and nutrient management. Handbook series. Potash and Phosphate Institute (PPI), Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Rice Research Institute, 191p.
- Dugue P, Gigou J. 2002. La gestion de la fertilité. In : *Mémento de l'Agronome*. CIRAD-GRET : 601-641.
- Ethan S, Odunze AC, Abu ST, Iwuafor ENO. 2011. Effect of water management and nitrogen rates on iron concentration and yield in lowland rice. *Agric. Biol. J. N. Am.*, **2**(4): 622 - 629.
- FAO. 2001. Evaluation de l'efficacité agronomique des phosphates naturels pour l'application directe en Afrique de l'Ouest: synthèse des résultats agronomiques expérimentaux, by G. Bizimungu, R.N. Roy & W. Burgos, Rome, 49 p.
- Fagaria NK, Santos NAB, Barbosa MP, Quimanques CM. 2008. Iron toxicity in lowland rice. *J. Plant Nutr.*, **31**(9): 1676-1699.
- Habib L, Chien SH, Menon RG, Carmona G. 1998. Modified iron oxide impregnated paper strip test for soils treated with phosphate fertilizers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **62**: 972-976.
- Hedley MJ, Bolan NS. 2003. Key outputs from reactive phosphate rock research in New Zealand. In *Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences*, Rajan SSS, Chien SH (eds). Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16-20 July 2001. Muscle Shoals, USA, IFDC. 441 pp.
- Kirk GJD. 2004. *The Biogeochemistry of Submerged Soils*. John Wiley et Sons: Chichester, UK; 291p.
- Kone B, Diatta S, Saidou A, Akintayo I, Cisse B. 2009. Réponses des variétés interspécifiques du riz de plateau aux

- applications de phosphate en zone de forêt au Nigeria. *Can. J. Soil Sci.*, **89**: 555 – 565.
- Kotchi V. 2002. Réponse de cinq cultivars de riz à l'apport du phosphate naturel de Tilemsi (Mali) sur sol acide de région forestière humide. Mémoire de fin d'étude d'agronomie à l'Ecole Supérieure d'Agronomie/Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny. Option: pédologie, p 72.
- Mathieu C, Pieltain F. 2003. *Analyse Chimique des Sols. Méthodes Choisies*. Editions Technique et Documentation : Londres-Paris-New York ; p. 387.
- Narteh LT, Sahrawat KL. 2006. Evaluation de la relation entre les méthodes sélectionnées de l'extraction du fer et quelques caractères de la croissance du riz. In *ADRAO, 2006. Toxicité Ferreuse dans les Systèmes à Base Riz d'Afrique de l'Ouest*. Centre du riz pour l'Afrique : Cotonou, Bénin, 167-189.
- Vizier JF. 1990. Etude du fonctionnement des milieux saturés d'eau. Une démarche physico-chimique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, **25**(4): 431- 442.
- Zapata F. 2002. Utilization of phosphate rocks to improve soil status for sustainable crop production in acid soils. Special issue. *Nut. Cyc. Agroecosys.*, **63**(1): 1-98.
- Zapata F, Roy R. 2004. Use of phosphate rocks for sustainable agriculture. *Plant Nutrition Bulletin* n° 13, FAO, Rome, Italie, p. 172.