

Impact à long terme des amendements phosphatés sur la dynamique du fer dans les sols rizières acides touchés par la toxicité ferreuse au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire

[Long-term effects of phosphate amendments on iron dynamics in acid rice soils affected by iron toxicity in west-central Côte d'Ivoire]

Kouassi Pla ADOU¹, Konan-Kan Hippolith KOUADIO¹, Affi Jeanne BONGOUA-DEVISME¹, Franck Michaël Lemonou BAHAN², and Anselme Kan Louis KOKO³

¹Laboratoire de Pédologie, UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire

²Centre National de Recherche Agronomique-CNRA, Station de Recherche de Man, Programme riz, Man, Côte d'Ivoire

³Office Chérifien des Phosphates (OCP) Africa, Côte d'Ivoire

Copyright © 2024 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In the tropical acidic soils of Gagnoa, Côte d'Ivoire, rice cultivation is hindered by phosphorus immobilization due to iron and aluminum oxides. Phosphate amendments, such as phosphate rock (RP) and triple superphosphate (TSP), are used to improve phosphorus availability but can remobilize iron, particularly in temporarily flooded lowland rice fields. This study evaluates the effect of eight phosphate amendment formulations on iron dynamics in acidic rice soils. Tested on five plots over three crop cycles, the formulations showed a significant reduction in leaf yellowing symptoms and brown spots, with a decrease of 50% in yellowed leaves and 43 to 67.6% in brown spots compared to unamended plots. Additionally, grain and straw yields increased due to reduced infertile tillers and panicle sterility. Regarding iron dynamics, the amendments reduced soluble, exchangeable, acid-soluble, and bioavailable iron fractions, leading to better yields and reduced iron toxicity. TSP, with its rapid solubility, proved effective in the short term, but its effects diminished over time. In contrast, RP, with its slow phosphorus release, maintained stable yields and reduced toxicity symptoms. These results highlight the importance of choosing the appropriate phosphorus form based on soil conditions to optimize long-term rice productivity.

KEYWORDS: iron toxicity, brown spots, leaf yellowing, iron forms, acidic soils, amendment, bioavailable iron.

RESUME: Dans les sols acides tropicaux de Gagnoa, Côte d'Ivoire, la culture du riz est freinée par l'immobilisation du phosphore due aux oxydes de fer et d'aluminium. Des amendements phosphatés, comme la roche phosphatée (RP) et le triple super phosphate (TSP), sont utilisés pour améliorer la disponibilité du phosphore, mais peuvent remobiliser le fer, surtout dans les rizières temporairement inondées. Cette étude évalue l'effet de huit formulations d'amendements phosphatés sur la dynamique du fer dans les sols rizières acides. Testées sur cinq parcelles durant trois cycles de culture, les formulations ont montré une réduction significative des symptômes de jaunissement des feuilles et des taches brunes, avec une diminution de 50% des feuilles jaunies et de 43 à 67,6% des taches brunes par rapport aux parcelles non amendées. En outre, les rendements en grain et en paille ont augmenté grâce à une réduction des talles infertiles et de la stérilité des panicules. Sur la dynamique du fer, les amendements ont réduit les fractions de fer hydrosoluble, échangeable, acido-soluble et biodisponible, contribuant à de meilleurs rendements et à une réduction de la toxicité ferreuse. Le TSP, avec sa solubilité rapide, s'est avéré efficace à court terme, mais ses effets ont diminué avec le temps. En revanche, la RP, avec sa libération lente du phosphore, a maintenu des rendements stables et réduit les symptômes de toxicité. Ces résultats montrent l'importance de choisir la forme de phosphore adaptée aux conditions du sol pour optimiser la productivité du riz à long terme.

MOTS-CLEFS: toxicité ferreuse, taches brunes, jaunissement des feuilles, Formes du fer, sols acides, amendement, fer biodisponible.

1 INTRODUCTION

Dans la plupart des sols tropicaux, les deux tiers des surfaces rizières sont situés sur des sols ferrallitiques fortement désaturés (Hyperdystric Ferralsole), caractérisés par une acidité marquée [1]. Cette acidité entrave considérablement l'absorption des éléments minéraux essentiels,

notamment le phosphore, dont la disponibilité pour les plantes est réduite en raison de son immobilisation par les oxydes de fer (Fe) et d'aluminium (Al) [2, 3]. Pour remédier à cette contrainte, l'apport d'engrais phosphatés dans ces sols acides est crucial pour améliorer les rendements agricoles [2,4,5]. Cependant, l'application de phosphore peut provoquer une remobilisation des ions métalliques, en particulier du fer et de l'aluminium, avec des effets complexes sur la dynamique des nutriments dans le sol [6]. Dans les rizières de bas-fonds, souvent inondées temporairement, la sorption du phosphore par les oxydes de fer peut devenir réversible en conditions anaérobies, telles que celles observées après une inondation [3]. Ce phénomène peut non seulement réduire la disponibilité du phosphore pour les cultures, mais aussi augmenter la concentration en fer ferreux (Fe²⁺) dans le sol [7]. Une présence excessive de fer ferreux peut induire un déséquilibre en éléments minéraux chez le riz, entraînant des conditions de toxicité ferrique qui compromettent la santé des cultures et réduisent la productivité des parcelles rizicoles [8, 9]. Le fer ferreux, absorbé en grande quantité par les plantes, peut s'accumuler dans les feuilles, provoquant une décoloration des limbes, une réduction du tallage et de la taille des plants, et entraînant une baisse significative des rendements [7,10]. De plus, dans les sols acides, un excès de fer est souvent observé, perturbant l'assimilation des nutriments essentiels, notamment le phosphore et le potassium [11].

Ainsi, une meilleure compréhension des interactions entre les amendements phosphatés et la dynamique du fer dans les sols acides est essentielle pour optimiser les pratiques agricoles dans les régions tropicales, en particulier dans le Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, où ces problématiques sont fréquemment rencontrées. C'est dans ce contexte, que des amendements phosphatés, composés de différentes proportions de roche phosphatée du Maroc (RP) et de fertilisants phosphatés chimiques solubles, tels que le Triple Superphosphate (TSP) et le NPK, ont été introduits pour limiter la baisse du pH des sols et améliorer la nutrition phosphatée en riziculture dans la région du Centre-Ouest, spécifiquement à Gagnoa. Cette étude vise à évaluer l'impact de ces amendements phosphatés sur la dynamique du fer dans les parcelles rizicoles acides de Gagnoa, où des problèmes de toxicité ferrique ont été observés.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 SITES D'ÉTUDE

Notre étude a été réalisée dans la région du Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, précisément à Gagnoa (6°07'54"N, 5°57'02"O), qui bénéficie d'un climat tropical et possède des sols classés en Ferralsol Dystric [2]. Cinq parcelles rizicoles villageoises de bas-fond, où des problèmes de toxicité ferreuse ont été constatés, ont été sélectionnées à Gagnoa au Centre de la Côte d'Ivoire: station de CNRA (06°08'2.0"N, 05°53'49.5"W), Zapata 1 (06°06'10.8"N, 05°56'6.4"W), Zapata 3 (06°06'20.8"N, 05°56'34.6"W), Lalane (06°04'55.0"N, 05°55'20.0"W), et campement Zoro (06°05'13.2"N, 05°55'8.6"W), en considérant chaque parcelle comme une répétition.

Des échantillons de sols ont été prélevés à la tarière à une profondeur de 0-20 cm sur chaque parcelle suivant leurs diagonales et mélangés pour obtenir un échantillon composite par parcelle. L'échantillon composite obtenu est ensuite tamisé à 2 mm et séché à l'air libre pour la caractérisation physico-chimique avant la mise en place de l'expérimentation.

2.2 MATÉRIEL

2.2.1 MATÉRIEL VÉGÉTAL

La variété de riz utilisée est WITA 9 et a été fournie par le Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) de Man. Elle a un cycle de 120 Jours, un rendement moyen de 6 t.ha⁻¹ avec un rendement potentiel de 10 t.ha⁻¹. Les caractéristiques de la variété WITA 9 sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques de la variété de riz WITA 9

Paramètres	
Hauteur (cm)	92 cm
Talles/m ²	205
Durée 50 % floraison (jour)	80 à 85
Rendement moyen	6 t.ha ⁻¹
Rendement potentiel	10 t.ha ⁻¹
Forme des grains	3,5 g
Toxicité ferreuse	Sensible
Poids 1000 grains	23,6 g
Parents génétiques	IR 2042-178-1 × CT 19

2.2.2 FERTILISANTS

La roche phosphatée (RP) utilisée provient du Maroc et a été fournie par l'OCP-Africa (Office Chérifien des Phosphates). Sa composition chimique est donnée dans le Tableau 2. Le TSP (Triple Superphosphate) a été fourni également par l'OCP-Africa et contient 30% de P₂O₅. Le NPK 15/15/15 et l'Urée 46% N ont été achetés sur le marché local et apportés respectivement à la dose de 100 kg ha⁻¹ comme fumure d'entretien, et de 200 kg.ha⁻¹ comme fumure de fond dans chaque parcelle.

Tableau 2. Caractéristiques chimiques de la roche phosphatée (RP) utilisée

Éléments chimiques	Teneur (%)
P ₂ O ₅	30
CO ₂	6,4
SO ₃	1,3
CaO	49,6
MgO	1,2
Fe ₂ O ₃	0,2
Al ₂ O ₃	0,2
F ₂ O	2,2
H ₂ O	2,1
SiO ₂	6,6

2.3 CONDUITE DES ESSAIS

L'expérimentation a été réalisée dans les cinq parcelles différentes de 200 m² de surface utile subdivisées en huit microparcelles de 25 m² où chaque microparcelle représente un traitement., dans un dispositif en blocs complètement randomisés. Six différents amendements phosphatés, résultant de la combinaison de roche phosphatée (RP) et de triple superphosphate (TSP), ont été apportés à la dose totale de 90 kg P₂O₅. ha⁻¹ soit 300 kg.ha⁻¹ de TSP et/ou RP avant le semis et qu'au début du premier cycle. Il s'agit des combinaisons 100% RP et 0% TSP (T1); 90% RP et 10% TSP (T2); 80% RP et 20% TSP (T3), 40% RP et 60% TSP (T4); 20% RP et 80% TSP (T5); 0% RP et 100% TSP (T6) (Tableau 2). A ces combinaisons s'ajoutent le témoin absolu (T0a, sans engrais) et la pratique paysanne (T0, NPK + Urée). Au total, l'essai comporte huit traitements 100% RP et 0% TSP (T1); 90% RP et 10% TSP (T2); 80% RP et 20% TSP (T3), 40% RP et 60%TSP (T4); 20% RP et 80% TSP (T5); 0% RP et 100% TSP (T6); Témoin sans engrais (T0a) et la pratique paysanne (T0, NPK). Le NPK 15-15-15 et l'Urée à 46% N ont été apportés en raison de 200 kg.ha⁻¹ et 100 kg.ha⁻¹ comme fumure de fond et fumure d'entretien respectivement pour chaque micro-parcelle sauf pour le témoin absolu.

2.4 COLLECTE DES DONNÉES

2.4.1 OBSERVATION MACROSCOPIQUE DE LA TOXICITE FERREUSE DES BAS-FONDS À L'ÉPIAISON FLORAISON

Pour évaluer la toxicité du fer sur l'état des plants de riz, les feuilles ont été examinées pour y suivre l'apparition éventuelle du symptôme de brunissement (Jaunissement des feuilles) entre le 29^{ème} et le 37^{ème} après repiquage (JAR), dans chaque parcelle et sous les différents traitements. Les symptômes foliaires ont été évalués selon le système de notation des feuilles fournies par le réseau international pour l'évaluation génétique du riz [12, 13]. Ce système de notation de la toxicité ferreuse est représenté dans le tableau 3. L'observation des tâches et de la couleur des feuilles a été effectuée trois fois dans l'intervalle indiqué afin d'avoir une moyenne à l'aide d'une plaquette couleur source selon la méthode décrite par [13].

Tableau 3. Score des symptômes foliaires en fonction des dommages dûs à la toxicité ferreuse

Pourcentage des feuilles affectées	Score
0	0
1-9	1
10-29	3
30-49	5
50-69	7
70-89	9
90-100	10 (feuilles mortes)



Fig. 1. Score des symptômes foliaires modifié adapté par [13]

2.4.2 PARAMETRES AGRONOMIQUES (RENDEMENT, TAUX DE TALLES INFERTILES ET TAUX DE STERILITE)

A la récolte, on a procédé au comptage des poquets, talles et panicules du carré de rendement. Ce qui a permis de déterminer le nombre de talles au mètre carré (TalT), le nombre de panicules au mètre carré (Pan) et le taux de talles infertiles (Infer).

$$Infer = \frac{TalT - Pan}{TalT} \times 100 \quad [1]$$

De même, le nombre total d'épillets par panicule (EPIL) et d'épillets vides par panicule (EPV), et le taux de stérilité (STERIL) a été calculé comme suit:

$$Steril = 100 \times EPV / EPIL \quad [2]$$

La biomasse, composée des panicules, des tiges et des feuilles, a été collectée dans chaque carré de rendement, séchée à l'air libre puis pesée pour déterminer le rendement en paille (RDP) par m². Le rendement en grains (RDG) a été déterminée après séchage des grains à l'air libre puis à l'étuve à 65°C durant 72 heures. Le rendement grain (RDG) a été calculé en ramenant les poids des grains à 14% d'humidité selon la formule ci-dessous:

$$RDG (14\%) = \frac{P1(100-h1)}{100-14} \quad [3]$$

À la fin du troisième cycle de culture, des échantillons de sol ont été prélevés selon les traitements appliqués dans chaque parcelle, tamisés à 2 mm et séchés à l'air libre. Les échantillons de sol de chaque parcelle ont ensuite été regroupés par traitement pour constituer un échantillon composite, destiné à la détermination des différentes fractions de fer présentes dans les sols, suite aux traitements appliqués."

2.4.3 DETERMINATION DES DIFFERENTES FRACTIONS DU FER DANS LE SOL

La détermination des différentes fractions de fer a été effectuée sur une même prise de 1g de sol. Les fractions observées sont la fraction hydrosoluble, extraite par l'eau pure; la fraction échangeable, extraite par KCl (0,1M); la fraction acido-soluble, extraite par HCl (0,5N); la fraction réductible liée aux oxydes de fer mal cristallisés (Ox Tamm), extraite par 25ml 10,92 g/l C₂O₄H₂ 2H₂O + 16,11 g.l C₂O₄ (NH₄)₂ H₂O; la fraction réductible liée aux oxydes de fer bien cristallisés (Ox CBD), extrait par: 25ml de 78,4 g.l Na₂-citrate+9.34g/l NaHCO₃ et Na₂S₂O₄. La fraction oxydable liée à la matière organique (Ox py) a été déterminée hors séquence sur une autre prise de 1g de sol par 25 ml Na₂P₂O₇ 10H₂O (0,1M) (Tableau 4).

La fraction de fer biodisponible, composée du fer hydrosoluble (Fe Hydro) et du fer échangeable (Fe Ech), qui représente la portion constamment accessible à la plante, a été évaluée. Par la suite, la fraction de fer moins biodisponible, incluant le fer acidosoluble (Fe Acido) et le fer associé à la matière organique (Fe MO), a été déterminée. Enfin, la fraction de fer non biodisponible, comprenant le fer lié aux oxydes de fer mal cristallisés (Fe Tamm) et le fer lié aux oxydes de fer bien cristallisés (Fe CBD), a également été estimée.

La teneur en fer total des échantillons de sol a été déterminée après fusion alcaline, selon le protocole décrit par [14] et dosé par spectrométrie d'émission plasma (ICP-AES), Jobin Yvon 2038.

Tableau 4. Protocole d'extraction séquentielle réalisée sur les échantillons de sol pour 100 mg de sol sec

Étapes	Fractions	Réactifs	Volume du réactif	Conditions
1	Hydrosoluble (Hydro)	Eau distillée	25 ml	1h d'agitation rotative, 30 min Centrifugation à 7500 tr/mn
2	Échangeable (Ech)	KCl (0,1M)	25 ml	1h d'agitation rotative, 30 mn centrifugation à 7500 tr/mn
3	Acido-soluble (Acido)	HCl (0,5N)	25 ml	1h d'agitation rotative, 5 min centrifugation à 2400 tr/min
4	Réductible (Ox Tamm)	10,92g ⁻¹ C2O4H2, 2H2O + 16,11g ⁻¹ C2O4(NH4)2, H2O	25ml	4 h d'agitation rotative, 30min centrifugation à 7500 tr/min
5	Réductible (OxCBD)	78,4g ⁻¹ Na2citrate + 9.34g ⁻¹ NaHCO3 et Na2 S2O4	25ml	30 min d'agitation rotative, 30 min centrifugation 7500 tr/min
Hors de la séquence	Fer total (Ox py)	25ml Na2P2O7 10H2O (0,1M).	25ml	16 h d'agitation rotative, 30 min de centrifugation à 18000 tr/min

2.5 ANALYSES STATISTIQUES

La significativité des différents traitements sur les différents paramètres agronomiques du riz a été faite selon le test de Student Newman-Keuls (SNK) à l'aide du logiciel SAS. Le test de Student Newman Keuls (SNK) a servi également pour la comparaison des proportions moyennes de fer des différentes formes de fer dans le sol selon la méthode de la plus petite différence significative (ppds) au seuil de significativité de 5%.

3 RÉSULTATS

3.1 CARACTERISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES ET MICROBIOLOGIQUES DES SOLS DES PARCELLES ÉTUDIÉES

3.1.1 CARACTÉRISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

La caractérisation des sols des cinq parcelles étudiées montre qu'ils ont une texture sablo-argilo-limoneuse (station de CNRA, et Campement Zoro) à sablo-limono-argileuse (Zapata 1, Zapata 3 et Lalane) avec 67 à 75,3% de sable, 11,2 à 19,4 % limons et 11 à 20,4 % d'argile. (Tableau 5). Quelle que soit les parcelles étudiées, les sols sont pauvres en N (1 à 2 g.kg⁻¹ sol sec), en C (10 à 27 g.kg⁻¹ sol sec) et en matière organique (20 à 54 g.kg⁻¹ sol sec) avec un rapport C/N compris entre 10 et 13,5 (Tableau 5).

A l'exception de la parcelle de la station de CNRA (242,3 mg de P_{total}.kg⁻¹sol sec et 32,2 mg de P_{ass}.kg⁻¹sol sec), les sols ont une teneur en phosphore total faible allant de 40,7 à 89,4 mg de P_{total}.kg⁻¹sol sec et de 2 à 8,2 mg de P_{ass}.kg⁻¹sol sec (Tableau 5). Quelle que soit les parcelles étudiées, les sols sont acides avec des pH compris entre 4,92 < pH_{eau} < 5,8 et entre 3,7 < pH_{KCl} < 4,9), ont une faible teneur en K⁺ (0,38 à 0,42 mmol⁺.kg⁻¹), Ca²⁺ (2,06 à 4,53 mmol⁺.kg⁻¹), Al³⁺ (0,1 à 0,45 mmol⁺.kg⁻¹), Fe²⁺ (293,5 à 580,9 mmol⁺.kg⁻¹), Mg²⁺ (0,73 à 1,9 mmol⁺.kg⁻¹), et Na⁺ (0,08 à 0,27 mmol⁺.kg⁻¹). La capacité d'échange cationique (CEC) des sols varie de 3,8 à 5,4 mmol⁺.kg⁻¹

3.1.2 DENOMBREMENT DES BACTERIES /G DE SOL SEC

L'étude du nombre de microorganismes totaux (MT) et celui des solubilisateurs du phosphore (MSP) a indiqué qu'il y a significativement plus de MT à P < 0.001 sur les sites de Zapata 1 et 3 (3550 à 3577 x 10⁴ bactéries/g sol sec) que sur les sites de Zorro (3001 x 10⁴ bactéries/g sol sec), Lalane (2360 x 10⁴ bactéries/g sol sec) et de la station de CNRA (1588 x 10⁴ bactéries/g sol sec) (Tableau 6). Quant au nombre de bactéries solubilisatrice des phosphates (MSP), les résultats montrent qu'il y a significativement plus de MSP à P < 0.001 sur les sites de Zapata 1 et 3 (705 à 708 x 10⁴ bactéries/g sol sec) que sur les sites de Zorro (591 x 10⁴ bactéries/g sol sec), Lalane (460 x 10⁴ bactéries/g sol sec) et de la station de CNRA (284 x 10⁴ bactéries/g sol sec) (Tableau 6).

Tableau 5. Dénombrement microbien (nombre de microorganismes $10^4/g$ de sol sec): microorganisme totales (MT) et microorganismes solubilisateurs de phosphore (MSP)

Sites	MT	MSP
Station	1588 ± 40 ^d	284 ± 24 ^d
Zapata 1	3577 ± 89 ^a	705 ± 86 ^a
Zapata 3	3550 ± 33 ^a	708 ± 76 ^a
Lalane	2360 ± 60 ^c	460 ± 55 ^c
Zorro	3001 ± 15 ^b	591 ± 34 ^b
Pr	0.001	0.001

Tableau 6. Caractéristiques physico-chimiques des sols dans la strate 0 - 20 cm avant expérimentation

Paramètres	SITES				
	Station	Zapata 3	Lalane	Campement Zoro	Zapata 1
Argile (%)	13,50	11,00	16,00	20,4	12,00
Limon (%)	11,20	15,00	17,00	14,3	19,40
Sable (%)	75,30	74,00	67,00	65,30	68,60
N (%)	0,10	0,10	0,20	0,13	0,12
C (%)	1,20	1,00	2,70	1,50	1,34
C/N	12,00	10,00	13,5	11,54	11,2
MO (%)	2,40	2,00	5,4	3,00	2,68
P (ass) mg/kg sol sec	32,20	8,2	7,00	2,80	3,6
P (tot) mg/kg sol sec	242,3	73,30	89,40	40,70	68,10
K ⁺ (cmol kg ⁻¹ sol sec)	0,32	0,28	0,42	0,31	0,38
Na ⁺ (cmol kg ⁻¹ sol sec)	0,08	0,10	0,08	0,10	0,27
Ca ²⁺ (cmol kg ⁻¹ sol sec)	2,12	3,67	4,23	2,06	4,53
Mg ²⁺ (cmol kg ⁻¹ sol sec)	0,73	1,5	0,94	1,04	1,46
Al ³⁺ (cmol kg ⁻¹ sol sec)	0,26	0,12	0,35	0,45	0,10
Fe ²⁺ (ppm) mg/kg sol sec	410,35	400,00	580,90	809,70	293,50
Fe (ppm) mg/kg sol sec	4182	3200	3850	3780	2909
pHeau	4,92	5,83	5,5	5,70	5,8
pKCl	3,7	4,6	4,4	4,3	4,9
CEC (cmol kg ⁻¹)	3,2	3,7	5,3	3,7	5,4

3.2 OBSERVATION MACROSCOPIQUE DE LA TOXICITE FERREUSE DURANT L'ÉPIAISON-FLOAISON DES PLANTS DE RIZ DANS LES PARCELLES EXPERIMENTALES

3.2.1 JAUNISSEMENT ET BRUNISSEMENT DES FEUILLES DURANT L'ÉPIAISON-FLOAISON DES PLANTS DE RIZ DANS LES PARCELLES EXPERIMENTALES

L'observation macroscopique de la toxicité ferreuse durant la période allant de l'épiaison à la floraison dans les casiers rizicoles a révélé la présence de taches brunes et un jaunissement des feuilles. L'évaluation du pourcentage de jaunissement et des taches brunes a montré globalement une réduction de ces symptômes dans les traitements amendés (T1, T2, T3, T4, T5 et T6) avec 31 à 37,7% de feuilles jaunies et 14,11 à 32,09% de taches brunes, quel que soit le cycle de culture, comparativement aux traitements non amendés (T0 et T0a) avec 73,44 à 92,8% de feuilles jaunies et 43,6 à 56,7 % de taches brunes (Tableau 7).

Plus spécifiquement, sous les traitements non amendés (T0 et T0 ab), on assiste à une augmentation de 5,6 à 30,8 % du taux de jaunissement des feuilles au cours des cycles de culture qui est passé de 65 à 90 % de feuilles jaunies au cycle 1 à 85 à 95 % de feuilles jaunies au cycle 3 (Tableau 7). Pour les traitements amendés avec une forte teneur en roche phosphatée (RP) c'est-à-dire sous les traitements T1, T2, T3 et T4, on assiste à une diminution de 23 à 42,8 % du taux de jaunissement des feuilles au cours des cycles de culture, passant de 38,33 à 46,7 % de feuilles jaunies au cycle 1 à 22,7 à 31,7 % de feuilles jaunies au cycle 3. En revanche, sous les traitements amendés avec forte teneur en Triple superphosphate (TSP) c'est-à-dire T5 et T6, on observe une augmentation de 40 à 428 % du taux de jaunissement des feuilles au cours des cycles de culture, passant de 11,66 à 25 % de feuilles jaunies au cycle 1 à 35 à 61,66 % de feuilles jaunies au cycle 3 (Tableau 7).

Concernant les taches brunes, sous les traitements non amendés (T0 et T0 ab), on assiste à une augmentation du taux de brunissement des feuilles de 4 à 19,37 % au cours des cycles de culture allant de 42,52 à 51,1 % de taches brunes au cycle 1 à 44,3 à 56,7 % de taches brunes au cycle 3 (Tableau 7). Pour les traitements amendés, avec une forte teneur en roche phosphatée (RP) c'est-à-dire sous les traitements T1, T2, T3 et T4, on assiste à une diminution du taux de brunissement des feuilles de 36,9 à 44,2 % au cours des cycles de culture, passant de 21,02 à 25,37

% de taches brunes au cycle 1 à 9,33 à 15,7 % de taches brunes au cycle 3 (Tableau 7). En revanche, sous les traitements amendés avec une forte teneur en Triple superphosphate (TSP) c'est-à-dire T5 et T6, on observe une augmentation du taux de brunissement des feuilles de 62,1 à 103 % au cours des cycles de culture, passant de 17,87 à 23,2 % de taches brunes au cycle 1 à 36,3 à 37,6 % de taches brunes au cycle 3 (Tableau 7).

3.2.2 EVALUATION DU SCORE DES SYMPTOMES FOLIAIRES DE LA TOXICITE FERREUSE

Dans l'ensemble, l'évaluation du score de toxicité ferreuse indique un score plus faible sur les traitements amendés (7,67 à 5,93), comparativement à ceux non amendés dont le score de toxicité varie entre 7,8 et 7,9 (Tableau 8). L'évaluation du score de la toxicité ferreuse montre une réduction significative du score de la toxicité du cycle 1 au cycle 3 pour les traitements riches en roche phosphatée (RP) c'est-à-dire T1, T2, T3 et T4 passant de 7,8 à 8 au cycle 1 à 7 à 4 au cycle 3 (Tableau 8). En revanche, pour les traitements pauvres en RP mais plutôt riche en triple superphosphate (TSP), c'est à dire sous les traitements T5 et T6, on constate une augmentation du score de la toxicité ferreuse passant de 4,8 à 6,4 au cycle 1 à 7,4 à 7,8 au cycle 3 (Tableau 8).

Tableau 7. Score des symptômes foliaires de la toxicité ferreuse

cycles	To	Toa	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Cycle 1	7,6a	8a	8a	8a	8a	7,8a	6,4c	4,8b
Cycle 2	7,8a	7,4a	6,2b	7b	8a	5,8b	7b	7a
Cycle 3	8,4a	8a	4c	5,4c	7b	4,2c	7,8a	7,4a
MG	7,93	7,8	6,07	6,8	7,67	5,93	7,07	6,40
CV	8,29	9,93	7,96	7,59	7,51	7,53	5,77	6,38
P > F	0,178	0,396	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,001	<0,0001

Les valeurs dans la même colonne, suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman-Keuls $p < 0,05$.

Sur la figure 2, on note, dans l'ensemble, une réduction des taches brunes, symptômes liés à la toxicité ferreuse, de 50 % pour les parcelles ayant reçu l'amendement phosphatés par rapport à celles non amendées (témoins: T0 et T0a). De même, on observe une réduction du jaunissement des feuilles de 46 % pour les parcelles ayant reçu l'amendement phosphatés par rapport à celles non amendées (témoins: T0 et T0a).

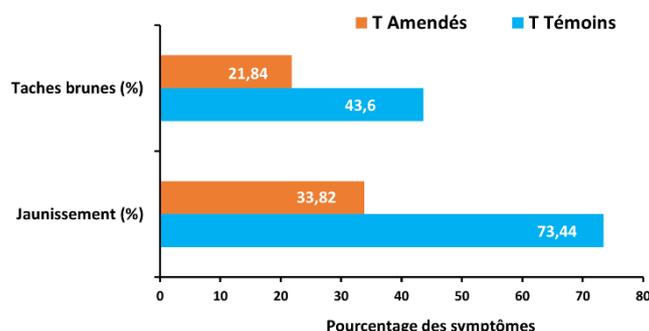


Fig. 2. Effet des amendements phosphatés sur les symptômes (taches brunes, jaunissement des feuilles) de la toxicité ferreuse

3.3 EFFET DES AMENDEMENTS PHOSPHATES SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES (RENDEMENT, TAUX DE TALLES INFERTILES ET TAUX DE STERILITE) DU RIZ IRRIGUE

3.3.1 RENDEMENT EN GRAIN ET EN PAILLE

Le tableau 9 présente les rendements en grain (RDG) et en paille (RDP) moyens du riz irrigué en fonction des amendements phosphatés. On note des différences très hautement significatives ($p < 0,0001$) entre les valeurs moyennes obtenues sous les sols amendés (T1, T2, T3, T4, T5, T6) et celles sous les sols non amendés (T0a et T0). Aussi, quelle que soit le cycle de culture, les rendements RDG et RDP, sont-ils significativement plus élevés lorsque l'amendement phosphaté est riche en RP (40 à 100% RP), c'est-à-dire sous les traitements T3, T4, T2 et T1 (Tableau 8) où on note 4,28 à 7,62 t.ha⁻¹ pour RDG et 4,44 à 6,32 t.ha⁻¹ pour RDP (Tableau 9). De plus, on assiste à une augmentation significative des rendements RDG et RDP du cycle 1 au cycle 3 sous les traitements riches en roche phosphatée (T1, T2, T3, T4). Les rendements RDP moyens varient entre 4,53 à 6,24 t.ha⁻¹ au cycle 1 et entre 6,94 à 8,93 t.ha⁻¹ au cycle 3. Les rendements en grain RDG passent de 4,69 à 6,43 t.ha⁻¹ au cycle 1 à 7,03 à 10,2 t.ha⁻¹ au cycle 3. Cependant, lorsque l'amendement phosphaté est riche en TSP, on assiste à une diminution significative des RDG et RDP du cycle 1 (5,61 à 6,06 t.ha⁻¹ pour RDP et 5,84 à 6,62 t.ha⁻¹ pour RDG) au cycle 3 (3,01 à 2,46 pour RDP et 2,31 à 2,73 t.ha⁻¹).

Tableau 8. Observation macroscopique (jaunissement et brunissement des feuilles de la toxicité ferreuse (%))

Traitements	Jaunissement des feuilles				Brunissement des feuilles			
	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Moyenne	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Moy
T0ab	90 ^a	93,33 ^a	95 ^a	92,8 ^a	51,11 ^a	58 ^a	61 ^a	56,7 ^a
T0	65 ^b	70,33 ^b	85 ^b	73,44 ^b	42,52 ^b	44 ^b	44,3 ^b	43,6 ^b
T1	46,7 ^c	39 ^c	26,7 ^e	37,46 ^c	24,3 ^c	19 ^d	15,33	19,54 ^e
T2	41,66 ^c	40 ^c	31,7 ^d	37,78 ^c	21,02 ^c	12 ^d	9,33 ^e	14,11 ^e
T3	39 ^d	36 ^c	25,7 ^e	33,56 ^c	25,37 ^c	18 ^d	15,66 ^d	19,66 ^e
T4	38,33 ^d	28 ^d	22,7 ^e	29,67 ^d	22,7 ^c	15 ^d	12,66 ^d	16,78 ^e
T5	25 ^e	33 ^c	35 ^d	31 ^c	23,2 ^c	35,3 ^c	37,6 ^c	32,03 ^c
T6	11,66 ^f	27 ^d	61,66 ^c	33,44 ^c	17,87 ^d	32,6 ^c	36,3 ^c	28,92 ^d
Pr > F	<0,001*	<0,01	<0,01	<0,001*	<0,01	<0,01	<0,01	<0,001*

Les valeurs dans la même colonne, suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman-Keuls $p < 0,05$. * hautement significatif au seuil de $p < 0,05$

3.3.2 TAUX DE STÉRILITÉ (STERIL) (INFER) ET TAUX DE TALLES INFERTILES

Dans l'ensemble, nos résultats montrent un taux de stérilité plus élevé sur les parcelles non amendées, avec un taux moyen de 24,45 % pour T0 et de 36,88 % pour T0a, par rapport aux parcelles amendées (T1, T2, T3, T4, T5, T6), dont les taux varient entre 7,29 % et 13,03 % (Tableau 10). À l'exception de T0 et T0a, l'arrière-effet des amendements phosphatés ont significativement influencé le taux de stérilité. En effet, on observe une diminution progressive de ce taux du cycle 1 au cycle 3 pour les traitements T1 (passant de 15,68 % au cycle 1 à 7,77 % au cycle 3), T2 (de 14,88 % à 11,99 %), T3 (de 14,55 % à 11,18 %) et T4 (de 13,22 % à 7,11 %). En revanche, une légère augmentation est constatée pour les traitements T5 (de 7,8 % à 9,26 %) et T6 (de 6,19 % à 8,91 %) (Tableau 10). Par ailleurs, le taux de stérilité des parcelles témoins non amendées (T0 et T0a) augmente également, passant respectivement de 23,45 % à 27,51 % pour T0 et de 34,3 % à 41,97 % pour T0a entre le cycle 1 et le cycle 3 (Tableau 10).

Le tableau 11 présente le taux de talles infertiles (Infer) après trois cycles de culture. Globalement, nos résultats révèlent un taux de talles infertiles plus élevé dans les parcelles non amendées, avec un taux moyen de 24,81 % pour T0 et de 40,92 % pour T0a, comparativement aux parcelles amendées (T1, T2, T3, T4, T5, T6), dont les taux varient entre 9,51 % et 17,86 % (Tableau 11). Par ailleurs, les résultats montrent que les amendements phosphatés ont eu un effet résiduel significatif sur la réduction des talles infertiles. En effet, on observe une diminution progressive du taux de talles infertiles du cycle 1 au cycle 3 pour les traitements T1, T2, T3 et T4, passant respectivement de 21,4 % à 13,54 %; de 13,71 % à 10,07 %; de 12,58 % à 9,96 %; et de 11,51 % à 7,69 % (Tableau 11). En revanche, pour les parcelles traitées avec T5 et T6, une augmentation du taux de talles infertiles est observée, passant de 9,8 % à 15,92 % pour T5 et de 9,34 % à 14,48 % pour T6 entre le cycle 1 et le cycle 3 (Tableau 11).

Tableau 9. Rendement moyen en grain (RDG) et en paille (RDP) sous les différents traitements après les trois cycles de culture

Traitement	RDP (t ha ⁻¹)				RDG (t ha ⁻¹)			
	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Moy	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Moyenne
T0a : -NPK	3,11d	2,57f	1,84e	2,51f	2,90e	2,38e	1,61e	2,30f
T0 : +NPK	4,08c	3,16f	2,91d	3,38e	3,60e	3,01e	2,84d	3,15e
T1 : 100%RP+NPK	4,83bc	5,06cd	6,94c	5,61c	4,69d	5,73c	7,26c	5,89c
T2 : 90%RP+10%TSP+NPK	4,93bc	5,68c	7,38bc	6,00bc	4,73d c	5,88c	7,03c	7,06b
T3 : 80%RP+20%TSP+NPK	5,51ab	6,81b	7,93b	6,75b	5,51c	7,08b	8,57b	7,06b
T4 : 60%RP+40%TSP+NPK	6,24a	7,68a	8,93a	7,62a	6,43ab	8,30a	10,24a	8,32a
T5 : 20%RP+80%TSP+NPK	5,61ab	4,44de	3,01d	4,36d	5,84bc	4,76d	2,73d	4,44d
T6 : 0%RP+100%TSP+NPK	6,06a	4,34e	2,46de	4,28d	6,62a	4,47d	2,31de	4,47d
Moy. G	5,05	4,97	5,18	5,06	5,04	5,20	5,32	5,19
CV (%)	17,08	12,03	17,59	25,15	13,25	14,44	13,24	26,64
Pr > F	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

Les valeurs dans la même colonne, suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman-Keuls $p < 0,05$. *** très hautement significatif au seuil de $p < 0,05$

Tableau 10. Taux de stérilité (stéril) paniculaire (%) au cours des trois cycles de culture

Traitements	Stéril Moyen (%)	Stéril (%) Cycle 1	Stéril (%) Cycle 2	Stéril Cycle 3
T0a	36,88a	34,30a*	34,38a*	41,97a**
T0	26,45b	23,20b*	28,65b*	27,51b*
T1	13,03c	15,68c*	15,64c*	7,77e**
T2	12,87c	14,88cd*	11,91d**	11,99c**
T3	12,54c	14,55d*	11,74d**	11,18c**
T4	9,03d	13,22e*	9,43e**	7,11e**
T5	8,83d	7,80f*	6,78f*	9,26d**
T6	7,29d	6,19g*	6,78f*	8,91d**
MG	15,87	16,23	15,66	15,71
CV	16,49	3,95	6,15	4,86
P> F	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

Les moyennes avec les mêmes lettres dans une même colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de $x = 0,05$.

Les moyennes avec les mêmes signes (*, **, ***, ...ou *****) sur une même ligne sont pas statistiquement différentes au seuil de $x = 0,05$.

Tableau 11. Taux de tiges infertiles (Infer, %) au cours des trois cycles de culture

Traitements	Infer Moyen	Infer Cycle 1	Infer Cycle 2	Infer Cycle 3
T0a	40,92 ^a	30,76 ^{a*}	41,92 ^{a**}	50,08 ^{a**}
T0	24,81 ^b	29,63 ^{a*}	22,95 ^{b**}	21,84 ^{b**}
T1	17,86 ^{bc}	21,40 ^{ab*}	18,63 ^{bc**}	13,54 ^{c***}
T2	12,10 ^c	13,71 ^{c*}	12,52 ^{c*}	10,07 ^{d**}
T3	11,31 ^c	12,58 ^{c*}	11,40 ^{c*}	9,96 ^{e**}
T4	9,51 ^d	11,51 ^{c*}	9,34 ^{d**}	7,69 ^{e***}
T5	12,50 ^c	9,80 ^{d*}	11,76 ^{c**}	15,92 ^{c***}
T6	11,28 ^c	9,34 ^{d*}	10,02 ^{c*}	14,48 ^{c**}
MG	17,54	17,34	17,32	17,95
CV	6,69	6,64	7,55	8,82
P> F	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

Les moyennes avec les mêmes lettres (a, b,...ou z) dans une même colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de $x = 0,05$.

Les moyennes avec les mêmes signes (*, **, ***, ...ou *****) sur une même ligne sont pas statistiquement différentes au seuil de $x = 0,05$.

3.4 EFFETS DES AMENDEMENTS PHOSPHATES SUR LA DYNAMIQUE DU FER DANS LE SOL

3.4.1 EFFETS DES AMENDEMENTS PHOSPHATES SUR FRACTIONNEMENT DU FER APRES TROIS CYCLES DE CULTURE

L'étude de la dynamique du fer dans le sol montre que les fractions de fer liées aux oxydes de fer peu ou mal cristallisé, dit "fer amorphe" (Fe Tamm) et à la matière organique (Fe MO) sont en quantité importante que les fractions liées aux oxydes de fer bien cristallisées et peu solubles (Fe CBD), celles hydrosolubles (Fe Hydro), échangeables (Fe éch) et acido-solubles (Fe acido), quelle que soit le traitement appliqué et le cycle de culture (Figure 3). En outre, nos résultats indiquent des proportions moyennes plus importantes de Fe Hydro (3,12 à 4,59%), Fe Ech (2,80 à 4,88%), et Fe Acido (4,07 à 5,07%) pour les sols non amendés (T0 et T0a) que ceux amendés (T1, T2, T3, 4, T5, T6), avec respectivement 0,57 à 1,88%, 0,87 à 2,20% et 2,35 à 2,86% (Tableau 12). Ainsi, on assiste à une diminution des proportions des fractions de Fe hydrosolubles et échangeable après trois cycles de culture sous les parcelles amendées par rapport à celle non amendées (Figure 3), passant de 4,24 sous T0a à 0,63 % sous T6 au cycle 1; de 5,09 sous T0a à 0,99 sous T5% cycle 2 et de 4,43 sous T0a à 0,43 % sous T2 au cycle 3 (Figure 3).

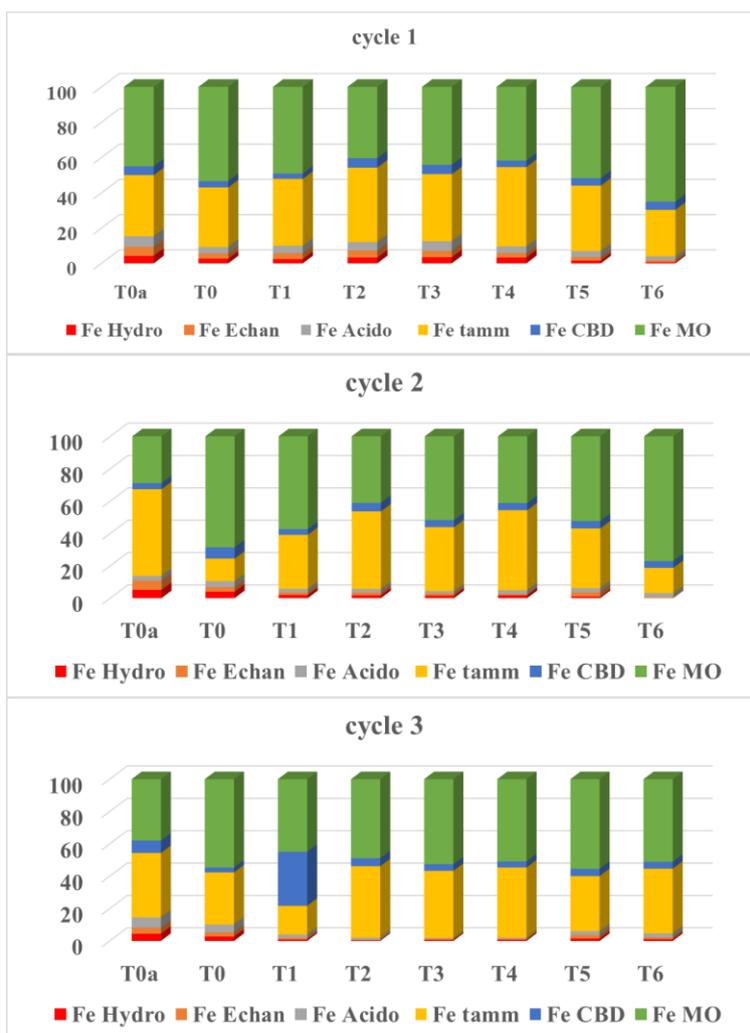


Fig. 3. Proportion (%) des différentes formes de fer dans les sols rizicoles sous différents traitements. Fe hydro: Fe hydrosoluble; Fe éch: Fe échangeable; Fe acido: Fe acido soluble; FeTamm: Fe liées aux oxydes de fer peu ou mal cristallisés; FeCBD: Fe liées aux oxydes de fer bien cristallisés et peu solubles; Fe MO: Fe liées à la matière organique

3.4.2 EFFET DES AMENDEMENTS PHOSPHATES (AP) SUR LA BIODISPONIBILITE DU FER DANS LES SOLS RIZICOLES

Sur la figure 4, les résultats montrent une réduction progression de la proportion de fer biodisponible du cycle 1 au cycle 3, plus particulièrement sous les sols amendés, comparativement aux sols non amendés. On assiste à une baisse du pourcentage en fer biodisponible passant de 9,48% sous T0 ou de 5,92% sous T0a à 3,14 à 3,75% sous T1 à T5 et à 1,44 sous T6 (Tableau 12). On note donc une diminution de 60 à 80% du pourcentage en fer biodisponible sous les sols amendés, comparativement aux sols n'ayant pas reçus d'AP (T0), avec une plus forte diminution lorsque l'amendement phosphaté (AP) est riche en triple super phosphate (TSP), c'est à dire sous les sols ayant reçu le traitement T6 (Tableau 12). Par contre, pour le fer peu biodisponible, les résultats indiquent une augmentation de la proportion de fer peu biodisponible suite à l'apport de de l'AP passant de 42,42% sous T0 à 46,31 à 66,9% sous les sols amendés (T1, T2, T3, T4, T5, T6), comparativement aux sols n'ayant pas reçus d'AP (T0). On constate donc une augmentation de 9 à 57% de la proportion de fer peu biodisponible suite à l'apport de l'AP, avec une plus forte augmentation sous les traitements T5 et T6 (Tableau 12). A l'exception des traitements T2 (49,93% de fer non biodisponible) et T4 (49,88% de fer non biodisponible), la proportion de fer non biodisponible passe de 48,11% sous T0 à 43% sous T1; 44,21% sous T2; 40,41% sous T5 et 31,66% sous T6 (Tableau 12), soit des diminutions de 9 à 34% de fer non biodisponible par rapport au témoin T0 (Tableau 12).

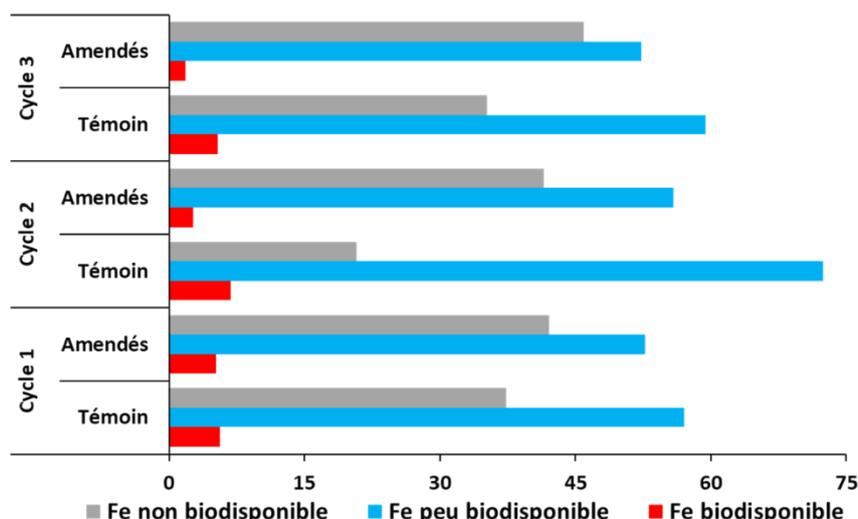


Fig. 4. Effet des amendements phosphatés sur la biodisponibilité du fer dans les sols rizicoles

Tableau 12. Proportion moyenne en fer (%) des différentes fractions de fer dans les sols rizicoles sous différents traitements. Fe hydro: Fe hydrosoluble; Fe éch: Fe échangeable; Fe acido: Fe acido soluble; Fe Tamm: Fe liées aux oxydes de fer peu ou mal cristallisés; Fe CBD: Fe liées aux oxydes de fer bien cristallisés et peu solubles; Fe MO: Fe liées à la matière organique; Fe bio: fer biodisponible; Fe peu bio: Fer peu biodisponible; Fe non bio: Fer non biodisponible

Traitements	Fe Hydro	Fe Echan	Fe Acido	Fe Tamm	Fe CBD	Fe MO	Fe bio	Fe peu bio	Fe non bio
T0a : aucune fertilisation	3,12	2,80	4,07	26,63	4,47	58,91	5,92	62,98	31,10
T0 : témoin de référence	4,59	4,88	5,07	42,68	5,42	37,35	9,48	42,42	48,11
T1 : 100 % RP + 0 % TSP	1,74	1,91	2,86	29,70	13,30	50,48	3,65	53,35	43,00
T2 : 90 % RP + 10 % TSP	1,80	1,95	2,84	44,76	5,17	43,48	3,75	46,31	49,93
T3 : 80 % RP + 20 % TSP	1,88	1,83	2,56	39,64	4,57	49,52	3,71	52,08	44,21
T4 : 60 % RP + 40 % TSP	1,95	1,19	2,35	45,95	3,93	44,63	3,14	46,98	49,88
T5 : 20 % RP + 80 % TSP	1,35	2,20	2,84	36,01	4,40	53,19	3,56	56,03	40,41
T6 : 0 % RP + 100 % TSP	0,57	0,87	2,47	27,35	4,32	64,43	1,44	66,90	31,66

Les valeurs dans la même colonne, suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman-Keuls $p < 0,05$.

4 DISCUSSION

4.1 ARRIERES EFFETS DES AMENDEMENTS PHOSPHATES (AP) SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU RIZ DE BAS-FOND

Les amendements phosphatés (AP) à base de roche phosphatée naturelle du Maroc (RP) et/ou de Triple super phosphate (TSP) ont induit des différences significatives sur plusieurs paramètres agronomiques du riz, notamment les rendements en grain et en paille, ainsi que les taux de talles infertiles et de stérilité paniculaires.

Les résultats montrent que la fertilisation phosphatée favorise la croissance du riz en réduisant les taux de talles infertiles et de stérilité paniculaires, ce qui se traduit par une amélioration des rendements en grain et en paille. Nos observations indiquent que l'apport de phosphore stimule le tallage et la croissance des panicules dans les rizières de bas-fonds, contribuant ainsi à de meilleurs rendements en paille et en grain. Ces conclusions sont cohérentes avec celles de [15], et de [16] qui ont rapporté que des doses élevées d'azote réduisent le nombre de talles infertiles. Pour [17] et [15], cette réduction du nombre de talles infertiles et de panicules stériles peut être attribuée non seulement à la dose de phosphore apportée, mais aussi à la richesse en azote des sols (0,10 % N). L'interaction entre ces deux éléments permet non seulement une meilleure croissance en hauteur des plants de riz, mais aussi une augmentation de la production de talles fertiles et de panicules non stériles. En effet, la présence d'azote dans le sol favorise l'absorption du phosphore et le remplissage des grains [15, 17]. De plus, une augmentation du développement végétatif du riz a été observée lors d'une fertilisation combinée en phosphore et azote [15].

Les essais menés avec différents amendements phosphatés ont montré que plus la proportion de roche phosphatée est élevée dans l'amendement (T1, T2, T3, T4), plus les taux de talles infertiles et de panicules stériles diminuent. De même, un enrichissement de l'amendement en triple super phosphate entraîne également une réduction des taux de talles infertiles et de panicules stériles. Ces résultats indiquent que, quelle que soit la source de phosphore dans l'amendement, la fertilisation phosphatée contribue à réduire de manière significative le nombre

de talles stériles et de panicules infertiles. Ainsi, une augmentation de la dose de phosphore entraîne une baisse du taux de stérilité du riz. Ces observations corroborent les résultats obtenus par [18] et [19]. De même, [20] ont constaté une réduction de la stérilité des panicules chez diverses variétés de riz en utilisant des doses croissantes de phosphore. [21] ont également affirmé que l'apport en phosphore diminue la production de fleurs stériles sur les plants de riz. Ces résultats suggèrent que la formation des talles et des panicules est directement liée à la disponibilité du phosphore dans le sol, de manière similaire à l'effet de l'azote, comme le mentionne [16]. Selon [5], ce développement abondant des talles et des panicules favorisera une augmentation des rendements. Toutefois, l'effet résiduel des amendements phosphatés (AP) a révélé une diminution des taux de talles infertiles et de panicules stériles, ainsi qu'une augmentation des rendements en grain et en paille du cycle 1 au cycle 3, lorsque l'AP est riche en roche phosphatée (RP). En revanche, lorsque l'AP est principalement composé de triple super phosphate (TSP), on observe une augmentation des taux de talles infertiles et de panicules stériles, accompagnée d'une baisse des rendements au fil des cycles. Cette différence semble liée à la nature du phosphore présent dans l'AP (RP ou TSP). Le triple super phosphate (TSP) est un fertilisant inorganique très soluble et rapidement assimilable par la plante. Cette forte solubilité peut entraîner une diminution progressive du phosphore disponible dans le sol au fil des années. Une réduction du phosphore disponible affecte l'assimilation de l'azote, ce qui peut freiner la croissance végétative du riz, augmentant ainsi le nombre de talles infertiles et de panicules stériles, comme l'ont démontré [22], ainsi que [2,4,5,15]. Par ailleurs, cette réduction entraîne une baisse de la production de matière sèche et des rendements en grain. En revanche, la roche phosphatée est un matériau naturel dont la dissolution est plus lente, produisant un effet résiduel à long terme, comme l'ont indiqué plusieurs études [2,4,5,15]. En effet, l'application d'engrais phosphatés solubles, tels que le TSP, libère rapidement du phosphore, tandis que la RP le libère de manière progressive, étendant ses effets bénéfiques sur plusieurs années [23, 24, 25, 5]. Ces résultats corroborent les travaux de [4] Koné et al. (2010), qui ont observé une augmentation des rendements sous des traitements à base de RP comparativement au TSP dans les rizières des zones de forêt semi-montagnaise de Côte d'Ivoire. De plus, les recherches de [17], qui ont testé les réponses de différentes variétés de riz à des doses croissantes de RP et de TSP, aboutissent à des conclusions similaires.

4.2 ARRIERES EFFETS DES AMENDEMENTS PHOSPHATES (AP) SUR LA MANIFESTATION DE LA TOXICITE FERREUSE CHEZ LE RIZ DE BAS FOND

Les résultats de l'observation macroscopique des symptômes de toxicité ferreuse sur le riz de bas-fond révèlent, chez les plantes n'ayant pas reçu d'amendement phosphaté (AP), une augmentation des taches brunes et du jaunissement des feuilles du cycle 1 au cycle 3. Cette aggravation de la toxicité ferreuse sur les feuilles de riz en absence d'AP pourrait être due à l'acidité des sols, qui affichent un pH compris entre 4,9 et 5,8, à la saturation en eau, ainsi qu'à la faible disponibilité en phosphore (moins de 32 mg/kg de P). En effet, la toxicité ferreuse est un désordre nutritionnel fréquemment observé dans les sols saturés en eau avec des concentrations en fer excédant 300 mg/kg [26]. La déficience en phosphore entraîne un déséquilibre nutritionnel chez le riz, conduisant à une absorption excessive de fer ferreux (Fe^{2+}), qui se trouve sous forme soluble dans le sol, provoquant ainsi une toxicité ferreuse [27].

Les résultats ont également révélé une augmentation des taches brunes et du jaunissement des feuilles du cycle 1 au cycle 3 chez les plantes ayant reçu des amendements phosphatés riches en TSP (T5 et T6). Cela pourrait s'expliquer par la nature du TSP, qui libère rapidement du phosphore assimilable, mais dont l'effet dans le sol est de courte durée. Au fur et à mesure que la quantité de phosphore disponible provenant du TSP diminue, les symptômes de toxicité ferreuse s'aggravent. [28] souligne que la teneur en phosphore assimilable diminue après une année de culture sur des sols tropicaux lessivés ayant reçu du phosphate soluble, ce qui entraîne une baisse des rendements. L'absorption excessive de fer par les plants de riz conduit non seulement à la décoloration des feuilles, mais aussi à une réduction significative du tallage et de la hauteur des plants [29], causant des pertes de rendement allant de 16 à 78 % [30, 31].

En revanche, chez les plantes ayant reçu des amendements phosphatés riches en RP, une réduction progressive des taches brunes et du jaunissement des feuilles a été observée du cycle 1 au cycle 3, avec une diminution des symptômes atteignant 50 % pour le traitement T2. Cela s'explique par l'effet progressif de la roche phosphatée (RP), qui libère le phosphore de manière plus lente et continue dans le sol. Selon [32], les manifestations de la toxicité ferreuse peuvent être attribuées à des déficiences en phosphore ainsi qu'à l'acidité des sols.

4.3 ARRIERES EFFETS DES AMENDEMENTS PHOSPHATES (AP) SUR LA DYNAMIQUE DU FER

L'étude de la dynamique du fer dans le sol après l'apport d'amendements phosphatés a révélé une diminution des fractions de fer hydrosoluble (Fe-Hydro), échangeable (Fe-Ech), acido-soluble (Fe-Acido) et biodisponible (Fe-Bio), comparativement aux sols non amendés. Les résultats montrent également une réduction progressive de la proportion de fer biodisponible du cycle 1 au cycle 3, particulièrement dans les sols amendés par rapport aux sols non amendés. Cette réduction des fractions de fer est attribuée à la dissolution de la roche phosphatée (RP) et à la grande solubilité du triple super phosphate (TSP) dans l'eau. En conditions réductrices (bas-fond), la concentration en fer ferreux augmente en raison de la réduction du fer ferrique, favorisant ainsi l'adsorption du phosphore par les ions ferreux, et par conséquent l'augmentation de la fraction P-Fe, comme l'ont montré [33]. Cette hausse de la fraction de phosphore lié aux oxydes de fer entraîne une baisse du fer dans les différentes fractions du sol. Nos résultats révèlent ainsi une fixation et une immobilisation du phosphore par les ions ferreux sous forme de phosphate de fer, suite à l'apport d'amendements phosphatés. Ce phénomène pourrait aussi expliquer la réduction des symptômes de toxicité ferreuse (taches brunes et jaunissement des feuilles de riz) du cycle 1 au cycle 3, observée chez les plants ayant reçu des AP. La faible proportion de fer biodisponible (Fe-Bio) et de fer peu biodisponible (Fe peu bio) dans les sols amendés, par rapport à ceux non amendés, est corrélée négativement aux rendements en grain et paille du riz plus élevés et positivement aux symptômes de toxicité ferreuse chez la plante dans les

parcelles amendées. Cela suggère que la majeure partie du phosphore absorbé par les plantes ne provient pas directement des amendements phosphatés, mais pourrait plutôt résulter du relargage de formes complexes de phosphore liées au fer ou à l'aluminium dans la solution du sol, ainsi que de la réduction de l'acidité, comme l'ont suggéré [33]. En outre, la diminution de l'acidité due à la solubilisation des amendements phosphatés, qui contiennent du calcium, pourrait ralentir la solubilisation du fer dans le sol. En milieu acide, le fer se combine avec l'acide phosphorique pour former des phosphates ferriques insolubles et non assimilables [34]. Ces résultats sont également en accord avec ceux de [35], qui ont observé une baisse significative du fer biodisponible après l'apport d'AP, ainsi qu'avec les travaux de [33], qui ont montré que les AP réduisent la toxicité ferreuse et aluminique. Ainsi, le phosphore libéré rapidement par le TSP ou plus lentement par la RP aurait tendance à immobiliser le fer biodisponible dans la solution du sol, entraînant une diminution des formes bio ou peu disponibles de fer [36, 37]. L'amélioration des paramètres du sol, tels que le pH et la disponibilité du phosphore labile, après l'apport d'AP [15, 2,], pourrait ainsi favoriser la fixation du phosphore sous forme de phosphate de fer, réduisant ainsi la fraction de fer biodisponible ou non biodisponible.

5 CONCLUSION

Les présentes études mettent en évidence l'importance des amendements phosphatés (AP) dans l'amélioration des paramètres agronomiques du riz de bas-fond. Les résultats montrent que l'apport de phosphore, qu'il provienne de la roche phosphatée naturelle (RP) ou du triple super phosphate (TSP), influence positivement la croissance, la fertilité et le rendement du riz en réduisant les taux de talles infertiles et de panicules stériles. Toutefois, les effets à long terme diffèrent en fonction du type d'amendement utilisé. Le TSP, en raison de sa solubilité rapide, stimule une croissance végétative initiale, mais son efficacité décroît avec le temps, entraînant une remontée des symptômes de toxicité ferreuse et une baisse du rendement. À l'inverse, la RP, avec sa libération lente et progressive du phosphore, permet une réduction continue des symptômes de toxicité ferreuse tout en maintenant un bon niveau de rendement sur plusieurs cycles. Par ailleurs, l'interaction entre la disponibilité du phosphore et la dynamique du fer dans le sol a révélé un lien crucial entre la diminution des fractions de fer biodisponibles et l'amélioration des rendements. En effet, l'immobilisation progressive du fer par les ions phosphore favorise un meilleur équilibre nutritionnel pour le riz, réduisant ainsi les effets néfastes de la toxicité ferreuse, notamment les taches brunes et le jaunissement des feuilles. L'utilisation des amendements phosphatés, et en particulier de la RP, apparaît comme une stratégie durable pour améliorer la productivité du riz de bas-fond tout en atténuant les effets négatifs de la toxicité ferreuse, fréquente dans les sols acides et saturés d'eau. Ces résultats soulignent l'importance de bien choisir la forme de phosphore à utiliser en fonction des conditions édaphiques et des objectifs à long terme pour optimiser la fertilité des sols et la performance des cultures.

REMERCIEMENTS

La concrétisation de ce projet a été rendue possible grâce à l'appui de l'Office Chérifien des Phosphates (OCP) en Côte d'Ivoire, dans le cadre de la mise en œuvre du projet ASORPRI -OCP Africa, Cette étude, menée au Centre National de Recherche Agronomique de Gagnoa (CNRA), a pu être réalisée grâce à la collaboration de la station de recherche CNRA et de leurs partenaires en milieu paysans, qui a généreusement mis à notre disposition des parcelles rizicoles pour la mise en place des expérimentations

REFERENCES

- [1] Sahrawat K. L., Jones M., Diatta S. and Adam A. Response of Upland Rice to fertilizer Phosphorus and its Residual Value in an Ultisol. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32 (15 & 16): 2457 – 2468, 2001.
- [2] Bongoua-Devisme, A. Jeanne, Kpan W. Hippolyte, Bahan L. F. M., Koné B., Kouadio K-K. H., Adou K. Pla, and Koko L. A. K. «Residual Effect of Phosphate Amendments on Agronomic Parameters of Rainfed Rice in Three Agroecological Zones of Côte d'Ivoire». *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 10 (3): 57-71, 2024. <https://doi.org/10.9734/ajsspn/2024/v10i3319>.
- [3] Maranguit D., Guillaume, T., Kuzyakov Y., Effects of flooding on phosphorus and iron mobilization in highly weathered soils under different land-use types: Short-term effects and mechanisms, *CATENA*, Volume 158, Pages 161-170, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.023>.
- [4] Koné B., Ettien J. B., Amadji G. L., Diatta S. et M. Camara. Effets d'engrais phosphates de différentes origines sur la production rizicole pluviale des sols acides en zone de forêt semi-montagneuse sous climats tropicaux: Cas des hyperdystric ferralsols sous jachères en Côte d'Ivoire. *Etude et gestion des sols*, 17 (1): 7 – 17, 2010.
- [5] Kpan W. H., Bongoua-Devisme A.J., Kouadio K.-K.H., Koné B., And Bahan F. M. L. Response of lowland rice to phosphate amendments in three acidics agroecological zones of Côte d'Ivoire: Man-Gagnoa-Bouaké. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 8 (5): 135-144, 2023 DOI: 10.22161/ijeab.85.18.
- [6] Jiaofeng, G., Yang H., Peng Z., Bohan L., Hang Z. Increasing phosphorus inhibits the retention and prevention of cadmium by iron plaque and promotes cadmium accumulation in rice plants, *Chemosphere*, Volume 307, Part 1, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135642>.

- [7] Cherif M., Fofana M., Audebert A. and Zouzou M. Significant aspects of iron toxicity in West Africa, pp. 141-148, In: Audebert A., Narteh L.T., Kiepe P., Millar D. and Beks B. (Editors.), *Iron Toxicity in Rice-based Systems in West Africa*, Africa Rice Center (WARDA), Cotonou, Benin 175 p, 2006.
- [8] Becker M. & Asch F. Iron toxicity in rice-condition and management concepts. *J. Plant Nutri. Soil Sci.* 168, 558-573, 2005.
- [9] Audebert A., Becker M., and Johnson D. Differential response of rice to hydrological conditions and agronomic management. *African Crop Sciences Journal* 4, 107-111, 1999.
- [10] Sonu N. S, Singh V.J., Pandey R., Gopala K. S., Bhowmick P.K., Ellur RK, Bollinedi H, Harshitha BS, Yadav S, Beniwal R, Nagarajan M, Singh AK and Vinod KK. Implications of tolerance to iron toxicity on root system architecture changes in rice (*Oryza sativa* L.). *Front. Sustain. Food Syst.* 7: 1334487, 2024. doi: 10.3389/fsufs.2023.1334487.
- [11] Saleem M. M., Muhammad A. and Muhammad Y. Effectiveness of Various Approaches to Use Rock Phosphate as a Potential Source of Plant Available P for Sustainable Wheat Production. *International Journal of Agriculture & Biology*, 15 (2): 223–230, 2013. <http://www.fspublishers.org>.
- [12] INGER, I. Standard evaluation system for rice. In *The International Rice Testing program*. The International Rice Research Institute. Los Banos. Philippines, 1988.
- [13] Wu, L.-B. B., Shhadi, M. Y., Gregorio, G., Matthus, E., Becker, M., & Frei, M. Genetic and physiological analysis of tolerance to acute iron toxicity in rice. *Rice* (New York, N.Y.), 2014. <https://doi.org/10.1186/s12284-014-0008-3>.
- [14] Mathieu, C. & Pieltain, F. *Analyse chimique des sols Méthodes choisies*. Lavoisier ed, Paris, 387 p., 2003.
- [15] Sanogo S., Paul A. K., Zoumana K., Mameri C. Evaluation de l'effet de doses d'azote et de phosphore sur des paramètres agromorphologiques et du rendement du riz : cas de la variété Djoukèmin dans un bas-fond de la région de Gagnoa. *Journal International de la Recherche Scientifique*, 1, 8–16, 2020.
- [16] Ngoucheme M, Fritz Oben, T, Gilles Raoul, L, M, & Jean, F. Effets combinés des dates de semis et de la fertilisation minérale sur la performance du riz NERICA L56 dans la plaine des Mbo, Cameroun. *Journal of Applied Biosciences*, 148, 15190–15201, 2020. <https://doi.org/10.35759/jabs>, 148,3.
- [17] Kotchi V, Yao-Kouamé A, Diatta S. Réponse de cinq variétés de riz à l'apport de phosphate naturel de Tilemsi (Mali) sur les sols acides de la région forestière humide de Man (Côte d'Ivoire). *J. Appl. Biosci.*, 31 (07): 1895-1905, 2010. DOI: <https://www.m.elewa.org/JABS/2010/31/3.pdf>
- [18] IRRRI International Rice Research Institute, 1995. *Rice Facts*. 3. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines, 1995.
- [19] Raju R A, Reddy M N and Reddy K A. Performance of phosphorus -Carriers in wetland rice (*Oryza sativa*, L.) on riverine alluvials. *Indian Journal of Agronomy* 42 (2): 272-4, 1997.
- [20] Alam, M. M., Amin, A. K. M. R., Ali, M., Ruhul, A., & Hasanuzzaman, M. Yield Attributes, Yield and Harvest Index of Three Irrigated Rice Varieties Under Different Levels Phosphorus. *Biological Research*, 2009.
- [21] Massawe P. I. and Mrema J. Effects of Different Phosphorus Fertilizers on Rice (*Oryza sativa* L.) Yield Components and Grain Yields. *Asian Journal of Advances in Agricultural Research* 3 (2): 1-13, 2017.
- [22] Bihari B, Singh YK, Shambhavi S, Mandal J, Kumar S, Kumar R. Nutrient use efficiency indices of N, P and K under rice-wheat cropping system in LTFE after 34th crop cycle. *J. Plant Nutr.*, 45 (1): 1-18, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1943674>.
- [23] Food and Agriculture Organization (FAO). *Socio-economic Analysis and Policy Implications of the Roles of Agriculture in Developing Countries*. Summary Report, Roles of Agriculture Project, FAO, Rome, Italy, 2004.
- [24] Ali Norhidayah, Kamaruzaman Jusoff, Syukriah Ali, Najah Mokhtar, Azni Syafena Andin Salamat, (2009). The Factors Influencing Students' Performance at University Teknologi MARA Kedah, Malaysia. *Article Management Science and Engineering* ISSN 1913-0341 Vol.3 No.4 2009 Canadian Research & Development Center of Sciences and Cultures. 12/20/2009 <http://www.cscanada.org> <http://www.cscanada.net> E-mail: cscanada.mse@gmail.com; caoc@hotmail.com 90 p.
- [25] Smalberger S, Chien SH, Singh U, Henao J. Relative agronomic effectiveness of phosphate rock compared with triple superphosphate for initial canola, wheat, or ryegrass, and residual wheat in two acid soils. *Soil Sci.*, 175 (1): 36-43, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1097/SS.0b013e3181c752dd>.
- [26] Bongoua-Devisme.A.J. Implication des communautés bactériennes ferri-réductrices et des paramètres environnementaux dans le fonctionnement et la qualité des sols de rizières (Thaïlande et Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en Sciences du Sol, option Géomicrobiologie, 230 p, 2009.
- [27] Fageria NK., Santos NAB., Barbosa MP., Quimanques CM. Iron toxicity in lowland rice. *J.Plant Nutr.*, 31 (9): 1676-1699, 2008.
- [28] Fox R. L. Phosphorus - A Basic Nutrient for Soil Improvement. K. M. Pretty and S. F. Dowdle (Eds.). *Proceedings of the International Conference on the Management and Fertilization of Upland Soils in the Tropics and Subtropics*. Chinese Academy of Sciences and The Ministry of Agriculture, Animal Husbandry and Fisheries of the People's Republic of China, Nanjing. pp. 57 - 63, 1998.
- [29] Tamaung, M. Physiological mechanisms of iron toxicity tolerance in lowland rice. Thesis in partial fulfillment of the requirements for the academic degree of Master of Science. Faculty of Agriculture Rheinische Friedrich-Wilhelm's Universität zu Bonn, 67p, 2006.
- [30] Chérif M., Audebert A., Fofana M. & Zouzou M. Evaluation of Iron Toxicity on Lowland Irrigated Rice in West Africa. *Tropicultura*, 2009, 27, 2, 88-92, 2009.

- [31] Audebert, A. et Fofana, M. Écart de rendement du riz dû à la toxicité du fer en Afrique de l'Ouest. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 196, 66-76, 2009 <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00339.x>.
- [32] Kirk GJD., *The Biogeochemistry of Submerged Soils*. John Wiley et Sons: Chichester, UK; 291p, 2004.
- [33] Kouakou S. A. A.E., Bongoua-Devisme A.J., Kouadio K-K. H., Gouze Bi A. D. et Bahan F. M. L. Effets combinés de la roche phosphatée du Maroc et de fertilisants chimiques sur la dynamique du phosphore dans le sol: cas des parcelles rizicoles de Man, Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique Science*, 24 (1): 1 – 13, 2024.
- [34] Diatta S., et Sahrawat R. K. Iron toxicity of rice in West Africa: screening tolerant varieties and the role of N, P, K and Zn. In A. Audebert, L. T. Narteh, P. Kiepe, D. Millar & B. Beks (Eds.), *Iron Toxicity in Rice-based Systems in West Africa* Africa Rice Center (WARDA). pp. 75-81, 2006.
- [35] Hodomihou R. N., Agbossou E. K., Amadji G. L. et Nacrao H. B. Effets de différentes doses de phosphate naturel sur la réduction de la toxicité ferreuse des sols du bas fond de Niaouli au sud Benin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 5 (6): pp.2278-2290, 2011.
- [36] Chien S. H., Sale P. W. G. and D. K. Friesen. A Discussion of the Methods for Comparing the Relative Effectiveness of Phosphate Fertilizers Varying in Solubility. *Fert. Res.*, 24: 149 – 157, 1990.
- [37] Sani, O., Zanguina, A., et Ibrahim, N. *Traitement Des Phosphates Naturels De Tahoua*. Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger. 176 p, 2017.