

## **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**

**Sainte Adélaïde Ahya Edith KOUAKOU<sup>1</sup>, Affi Jeanne BONGOUA-DEVISME<sup>1\*</sup>,  
Konan-Kan Hippolyte KOUADIO<sup>2</sup>, Alex Djangone Bi GOUZE<sup>2</sup>  
et Franck Michaël Lemounou BAHAN<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Université Felix Houphouët-Boigny, Cocody, UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières,  
Laboratoire de Pédologie et Agriculture Durable, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

<sup>2</sup> *Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), Station de Recherche de Man, BP 4040, Côte d'Ivoire*

(Reçu le 11 Octobre 2023 ; Accepté le 18 Décembre 2023)

---

\* Correspondance, courriel : [bongoua\\_jeanne@yahoo.fr](mailto:bongoua_jeanne@yahoo.fr)

### **Résumé**

Ce travail porte sur l'effet de huit amendements phosphatés élaborés à partir de roche phosphatée et de triple superphosphate, sur la dynamique du phosphore des sols après deux cycles de culture. Des essais agronomiques en blocs complets randomisés ont évalué les rendements en grain et en paille à l'hectare. Après deux cycles de culture, les échantillons de sols ont été prélevés et une extraction séquentielle a été réalisée pour estimer les différentes formes de phosphore. Les résultats indiquent une amélioration significative des rendements, avec des gains notables de 1,5 à 6,5 t/ha par rapport aux traitements témoins. L'application des amendements a entraîné une augmentation marquée du pH des sols, de 1,4 à 2 unités par rapport au sol non amendé. L'étude des formes de phosphore a montré une augmentation significative dans les fractions hydrosolubles (271 à 992,3 mgP/kg sol sec), échangeable (207 à 2380 mgP/kg sol sec) et organiques (1240 à 4280 mgP/kg sol sec), ainsi qu'une diminution de la fraction inorganique en raison du relargage du phosphore, aluminium, et calcium dans le sol. Cette étude souligne l'importance des amendements phosphatés pour l'amélioration des rendements agricoles mais préconise une optimisation de son utilisation pour une agriculture durable et productive.

**Mots-clés :** *amendement, triple superphosphate, roche phosphatée, fractionnement, extraction séquentielle.*

### **Abstract**

**Combined effects of phosphate rock and chemical fertilizers on the dynamics of phosphorus in the soil : case of paddy soils in Man, Western Ivory Coast**

This study focuses on the effect of eight phosphate amendments made from phosphate rock and triple superphosphate on soil phosphorus dynamics after two crop cycles. Agronomic trials were using randomized complete block design assessed grain and straw yields per hectare. After two crop cycles, soil samples were collected, and sequential extraction was performed to estimate various phosphorus forms. The results indicate

a significant improvement in yields, with notable gains ranging from 1.5 to 6.5 t/ha compared to control treatments. The application of amendments led to a marked increase in soil pH, ranging from 1.4 to 2 units compared to control soil. Examination of phosphorus forms revealed a significant increase in water-soluble fractions (271 to 992.3 mgP/kg dry soil), exchangeable fractions (207 to 2380 mgP/kg dry soil), and organic fractions (1240 to 4280 mgP/kg dry soil), along with a decrease in the inorganic fraction due to the release of phosphorus, aluminum, and calcium into the soil. This study underscores the importance of phosphate amendments for enhancing agricultural yields but advocates for optimizing their use for sustainable and productive farming practices.

**Keywords :** *amendment, triple superphosphate, phosphate rock, fractionation, sequential extraction.*

## 1. Introduction

Dans les régions tropicales, notamment en Côte d'Ivoire, le riz joue un rôle central dans l'alimentation de la population. Toutefois, la production nationale ne parvient qu'à répondre à environ 50 % de la demande annuelle estimée à 1 500 000 tonnes de riz blanchi. Cette insuffisance est en partie attribuable au fait que les deux tiers des surfaces rizicoles reposent sur des sols ferrallitiques fortement désaturés, conduisant à une acidité du sol [1]. En Côte d'Ivoire, particulièrement à Man, les sols agricoles subissent diverses formes de dégradation physique, chimique et biologique en raison de pratiques culturales inappropriées [2 - 5]. La surexploitation des terres cultivées au détriment des jachères, l'utilisation excessive d'engrais minéraux, associée à des problèmes d'érosion et de lessivage, contribuent à la baisse de la fertilité des sols. Cette dégradation, marquée par une diminution progressive du taux de matière organique et une acidification croissante des sols, devient une préoccupation majeure pour les agriculteurs engagés dans une agriculture durable [6 - 8]. Dans ces sols acides, la disponibilité des éléments nutritifs, notamment le phosphore, est limitée en raison de leur réaction avec certains cations métalliques tels que l'aluminium et le fer [9] ce qui le rend peu accessible pour les plantes. Le phosphore, élément vital pour la croissance des plantes et notamment du riz, est souvent considéré comme l'un des facteurs limitants dans les sols agricoles, entraînant une diminution des rendements et une détérioration de la qualité des récoltes [3, 10]. Pour pallier le déficit en phosphore biodisponible dans les sols, des engrais phosphatés sont généralement utilisés [11], mais seulement 1 % est effectivement utilisé par les plantes [12], tandis que le reste précipite après leur application [13, 14]. De plus, les coûts élevés des engrais chimiques rendent cette pratique financièrement inaccessible pour les petits agriculteurs africains, d'où la nécessité de trouver une alternative plus économique [15, 16]. Dans cette optique, différents amendements phosphatés, élaborés à partir de roche phosphatée du Maroc (RP) et de triple superphosphate (TSP), sont testés au champ pour évaluer leur impact sur la dynamique du phosphore des sols dans les parcelles rizicoles en plateau et en bas-fond après deux cycles successifs de culture.

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Site d'étude

Notre étude a été réalisée à l'ouest de la Côte d'Ivoire sur deux parcelles expérimentales de la station du Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) : au bas-fond (N 7°21'12" ; W 7°36'19") et au plateau (N 7°20'57" ; W 7°36'19"). Avant la mise en place des essais, des échantillons composites de sols ont été prélevés entre 0 -20 cm de profondeur sur chaque parcelle puis analysés où les résultats de la caractérisation physico-chimique des sols des sites d'essais sont consignés dans le **Tableau 1**.

**Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques des sols avant expérimentation**

| Paramètres                                  | Valeurs          |                   |
|---|------------------|-------------------|
|   | Ecologie Plateau | Ecologie Bas-Fond |
| Argile (%)                                  | 29               | 6                 |
| Limon (%)                                   | 16               | 13                |
| Sable (%)                                   | 55               | 81                |
| pH eau                                      | 5,2              | 5,6               |
| pH KCl                                      | 3,6              | 4,3               |
| P assi (g.kg <sup>-1</sup> sol sec)         | 5                | 2,1               |
| C organique (g.kg <sup>-1</sup> sol sec)    | 143              | 69                |
| N total (g.kg <sup>-1</sup> sol sec)        | 13               | 7                 |
| MO (g.kg <sup>-1</sup> sol sec)             | 246              | 120               |
| C/N   | 11               | 9,8               |
| K <sup>+</sup> (g.kg <sup>-1</sup> sol sec) | 0,96             | 0,22              |
| Na <sup>+</sup> (mmol+.kg <sup>-1</sup> )   | 0,08             | 0,03              |
| Ca <sup>++</sup> (mmol+.kg <sup>-1</sup> )  | 4,96             | 2,47              |
| Mg <sup>++</sup> (mmol+.kg <sup>-1</sup> )  | 2,4              | 0,78              |
| CEC (mmol+.kg <sup>-1</sup> )               | 8,5              | 3,4               |
| S/T (%)                                     | 15,66            | 10,27             |

### 2-2. Matériel végétal

Deux variétés de riz ont été utilisées pour les cultures et ont été fournies par le Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) de Côte d'Ivoire. Il s'agit de la variété WITA 9 qui se cultive généralement dans le bas-fond et de la variété IDSA 10 qui se cultive généralement sur les plateaux et les pentes (*Figure 1*).



**Figure 1 : Matériel végétal (A : IDSA 10 ; B : WITA 9)**

### 2-3. Matériel fertilisant

La roche phosphatée du Maroc (RP), dont la composition est présentée dans le *Tableau 2*, et le TSP (Triple Superphosphate), contenant également 45 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ont été fournis par l'office chérifien du phosphate (OCP). L'engrais azoté utilisé est l'urée 46 % N et le NPK 15/15/15 sont les engrais chimiques apportés comme complément dans cette étude qui ont été achetés sur le marché local (*Figure 2*).



**Figure 2 : Matériel fertilisant (C : Roche Phosphatée naturelle ; D : Triple super phosphate ; E : NPK 15/15/15 et F : Urée 46 % N)**

**Tableau 2 : Caractéristiques chimiques de la roche phosphatée utilisée**

| Éléments chimiques | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | CO <sub>2</sub> | SO <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | F    | H <sub>2</sub> O | SiO <sub>2</sub> |
|--------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-------|------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|------------------|
| Teneur (%)         | 30                            | 6,44            | 1,29            | 49,54 | 1,16 | 0,20                           | 0,4                            | 2,21 | 2,03             | 6,64             |

#### 2-4. Conduite de l'essai

L'expérimentation a été réalisée sur une parcelle de 1000 m<sup>2</sup> de surface utile subdivisée en huit blocs de 200 m<sup>2</sup> de surface utile bloc où chaque bloc est considéré comme une répétition. Chaque bloc est subdivisé en 8 micros parcelles de 25 m<sup>2</sup> où chaque microparcelle représente un traitement. Au total huit traitements ont été appliqués par bloc et cinq blocs ont été réalisés sur chaque parcelle. Les traitements appliqués sont les suivants : T0a : Témoin absolu (sans apport de NPK) ; T0 : NPK ; T1 : 100 % RP + 0 % TSP + NPK ; T2 : 90 %RP +10 % TSP + NPK ; T3 : 80 %RP +20 % TSP+NPK ; T4 : 60 %RP +40 % TSP+NPK ; T5 : 20 %RP +80 % TSP+NPK ; T6 : 0 % RP+ 100 % TSP + NPK. Les engrais phosphatés (TSP, RP, NPK) apportés comme fumure de fonds qu'au premier cycle dans les parcelles. Ces amendements ont été apportés à la dose totale de 90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> soit 300 kg TSP et/ou RP ha<sup>-1</sup>, excepté les traitements témoins (T0 et T0a). L'engrais ternaire (NPK 15-15-15) quant à lui a été apporté en raison de 200 kg/ha, comme fumure de fond pour chaque parcelle sauf le traitement témoin T0a. Un apport total de 100 kg.ha<sup>-1</sup> d'Urée 46 % a été fait à la volée en raison de 50 kg.ha<sup>-1</sup> au stade de tallage et 50 kg.ha<sup>-1</sup> au stade de la montaison. A la fin du 2<sup>ème</sup> cycle de culture, dans chaque parcelle, des échantillons de sols ainsi que la biomasse (paille et grain) ont été récoltés par traitement et séchés à la température ambiante. Les échantillons de sols ont été tamisés à 2 mm puis la partie fine servira à l'analyse chimique et à l'extraction séquentielle. La paille et les grains de riz ont été récoltés puis leur poids a été déterminé pour estimer le RDG et rendement paille RDP. Les teneurs en P de la biomasse a également été analysée. La détermination de la teneur en phosphore dans les végétaux (paille et riz) a été faite par spectrophotomètre d'absorption au Laboratoire National d'appui au Développement Agricole (LANADA).

#### 2-5. Extraction séquentielle

L'étude des différentes formes du phosphore s'est faite de la manière suivante : sur une même prise de 1 g de sol des extractions séquentielles ont été réalisées selon la méthode proposée par [17]. Cette méthode permet de séparer successivement la fraction hydrosoluble extraite à l'eau pure ; la fraction échangeable ou phosphore labile (P labile) extraite par NH<sub>4</sub>Cl (1M) ; la fraction liée aux hydroxydes d'aluminium (P-Al) extraite par NH<sub>4</sub>F (0.5M) ; la fraction liée aux oxydes de fer (P-Fe) extraite par NaCl (0.1M) + NaOH (0.1M) ; la fraction liée aux calciums (P-Ca) extraite par H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0.25) + NaCl (solution saturée) ; la fraction liée à la matière organique (P-org) extraite par H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0.2N) ; la fraction résiduelle (P-res) extraite par H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0.5M) + 1g de K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>. Le phosphore total (P-total) a été déterminé hors séquence sur une autre prise de 1g de sol par un acide fort HClO<sub>4</sub> (11,6M). Après extraction une goutte d'acide HCl (1N) est ajoutée dans les solutions extraites pour éviter la précipitation du phosphore (**Tableau 3**). Le dosage du phosphore en solution est ensuite déterminé par spectrophotométrie de masse (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS). Les analyses ont été effectués au Laboratoire National d'appui au Développement Agricole (LANADA).

**Tableau 3 : Protocole d'extractions séquentielles réalisées sur les échantillons de sols pour 100 mg de sol sec**

| Etapes              | Fractions                           | Réactifs   | Volume du réactif                                | Conditions  |
|---------------------|-------------------------------------|--|--|---|
| 1                   | Hydrosoluble (hydro)                | Eau ultra pure   | 50 ml  | 1h d'agitation rotative, 30 min, Centrifugation à 2400 tr/mn  |
| 2                   | Echangeable (Ech)                   | NH <sub>4</sub> CL (1M)  | 50ml   | 30 mn d'agitation rotative, 5 mn centrifugation à 2400tr/mn   |
| 3                   | P-AL(basique)                       | NH <sub>4</sub> F ; pH =7 (0,5 M)  | 50ml   | 1h d'agitation rotative, 5 min centrifugation à 2400tr/min  |
| 4                   | P-Fe (Acide)                        | Nacl (0,1 M) + NaOH (0,1 M)  | 25ml Nacl + 50 ml NaOH                           | 10mn d'agitation rotative, 5min centrifugation à 2400tr/min, 5min centrifugation à 2400tr/min, 8h d'agitation rotative, centrifugation 15 min à 2400 tr/min |
| 5                   | P-Ca(neutre)                        | Nacl (solution saturée) + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,25 M)  | 25ml Nacl + 50 ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 10 min d'agitation rotative, 5 min centrifugation 2400 tr/min, 60 min d'agitation rotative, 5 min de centrifugation à 2400 tr/min                           |
| 6                   | P. Organique (P org)                | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,2 N)   | 50 ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>             | 16h de digestion  |
| 7                   | P. Résiduel (P rés)                 | 1g de K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> + 1ml de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,5 M) dans 24 ml d'eau ultra pure | 25ml   | Autoclavé à 120°C pendant 30 min  |
| hors de la séquence | Phosphore total (P <sub>tot</sub> ) | 20 ml de HClO <sub>4</sub> (11,6 M)  | 20ml   | 16h de digestion  |

## 2-6. Analyses statistiques des données

L'analyse statistique a été effectuée à l'aide du logiciel statistica analysis system (SAS) version 9.0, au seuil de significativité de 5 % selon le test de Student and Newman-Keuls (SNK) pour comparer les moyennes observées sous les différents traitements.

## 3. Résultats

### 3-1. Évolution du pH après deux cycles de culture dans les sols (Bas-fond / Plateau)

Quel que soit l'écologie des parcelles, on assiste à une augmentation du pH des sols de plateau et de bas fond de la station de recherche CNRA de Man suite à l'apport d'amendement phosphaté (T1 à T6) passant de 5,2 à 7,1 pour les sols de plateau et de 5,6 à 7,3 pour les sols de bas fond, par rapport à aux sols non amendés (T0) où les sols s'acidifient 5,2 à 4,54 pour les sols de plateau et 5,6 à 4,7 pour les sols du bas fond. Toutefois, cette hausse du pH est significativement plus élevée sous les traitements T3 pour les sols du plateau et T4 pour les sols de bas-fonds (*Tableau 4*).

**Tableau 4 : Évolution du pH du sol après deux cycles de culture**

| Traitements           | Plateau |       | Bas-fond |       |
|-----------------------|---------|-------|----------|-------|
|                       | Avant   | Après | Avant    | Après |
| T0a sans NPK          | 5,2     | 4,43  | 5,6      | 4,31  |
| T0 avec NPK           | 5,2     | 4,54  | 5,6      | 4,7   |
| T1 100 % RP           | 5,2     | 6,62  | 5,6      | 6,78  |
| T2 90 % RP + 10 % TSP | 5,2     | 6,77  | 5,6      | 6,84  |
| T3 80 % RP + 20 % TSP | 5,2     | 7,1   | 5,6      | 6,97  |
| T4 60 % RP + 40 % TSP | 5,2     | 6,89  | 5,6      | 7,3   |
| T5 20 % RP + 80 % TSP | 5,2     | 5,85  | 5,6      | 6,37  |
| T6 0 % RP + 100 % TSP | 5,2     | 5,7   | 5,6      | 6,28  |

### 3-2. Rendement moyen en grain RDG (t/ha) des parcelles rizicoles de plateau et de bas-fond après deux cycles de culture

Comparativement aux sols non amendés (traitements témoins T0a et T0) avec 0,7 à 1,13 t/ha au plateau et 1,3 à 1,8 t/ha au bas-fond, on note une augmentation significative du RDG avec 1,45 à 3,7 t/ha au plateau et 3,6 à 6,5 t/ha au bas-fond sous les traitements amendés (T1, T2, T3, T4, T5, T6) (**Tableau 5**). Mais, ces rendements sont plus importants sous les sols de bas-fonds (4,13 t/ha) que ceux du plateau (2,192 t/ha). Une augmentation significative  $P < 0,001$  du RDG est également constatée lorsque l'amendement phosphaté contient 60 à 80 % de RP (T3 et T4) au plateau. Par contre au bas-fond, on note une augmentation significative du RDG lorsque l'AP contient 60 % RP(T4) (**Tableau 5**).

**Tableau 5 : Rendement en grain RDG(t/ha) des parcelles rizicoles de plateau et de basfond sur les deux cycles de culture en fonction des traitements**

| Traitements          | Ecologie |          |
|----------------------|----------|----------|
|                      | Plateau  | Bas-fond |
| T0a sans NPK         | 0,70f    | 1,34e    |
| T0 avec NPK          | 1,13e    | 1,80e    |
| T1 100 % RP          | 2,53b    | 4,69bc   |
| T2 90 % RP + 10% TSP | 2,54b    | 5,41b    |
| T3 80 % RP + 20% TSP | 3,67a    | 5,38b    |
| T4 60 % RP + 40% TSP | 3,74a    | 6,53a    |
| T5 20 % RP + 80% TSP | 1,76c    | 4,30cd   |
| T6 0 % RP + 100% TSP | 1,45d    | 3,6d     |
| CV                   | 11,83    | 13,75    |
| Pr>F                 | <,0001   | <,0001   |
| RDG Moyen            | 2,192    | 4,13     |

Dans une colonne, les chiffres suivies par une même lettre ne sont pas significativement différents selon le test de Newman-Keuls au seuil de probabilité de 5 %.

### 3-3. Teneur en phosphore (P) dans la biomasse (paille et grains de riz) après deux cycles de culture

Quel que soit le traitement apporté, la teneur des éléments nutritifs des pailles et des grains de riz contiennent en moyenne 1,04 à 2,08 gP/kgMS pour les sols de bas-fonds et 1,29 à 1,55 gP/kgMS pour les sols de plateaux (**Tableau 6**). Les résultats obtenus révèlent également que quel que soit l'écologie étudié et le traitement appliqué, la teneur moyenne en P des pailles et grain de riz est inférieure à 2 gP/kgMS excepté sous le traitement T4 (60 % RP) dans le bas-fond (**Tableau 6**).

**Tableau 6 : Teneur en phosphore (P) dans la paille et les grains de riz (Bas fond/ Plateau)**

| Traitements           | Ecologies        |                   |
|-----------------------|------------------|-------------------|
|                       | gP/kg MS Plateau | gP/kg MS Bas-fond |
| T0a sans NPK          | 1,29             | 1,04              |
| T0 avec NPK           | 1,26             | 1,115             |
| T1 100 % RP           | 1,44             | 1,375             |
| T2 90 % RP + 10 % TSP | 1,45             | 1,465             |
| T3 80 % RP + 20 % TSP | 1,55             | 1,645             |
| T4 60 % RP + 40 % TSP | 1,53             | 2,08              |
| T5 20 % RP + 80 % TSP | 1,29             | 1,39              |
| T6 0 % RP + 100 % TSP | 1,3              | 1,165             |

### 3-4. Quantification du P provenant de l'amendement phosphaté prélevé par la plante

Comparativement au traitement témoin, la quantité de P provenant de l'amendement phosphaté (AP) qui été prélevé par la plante est significativement plus importante sous les traitements T3 (0,29 g/kgMS) et T4 (0,27 g/kgMS) pour les sols de plateau alors que pour les sols de bas-fond, elle est significativement élevée sous le traitement de T4 (0,97 g/kgMS) suivi du traitement T3 (0,53 g/kgMS) (**Tableau 7**). L'estimation de la quantité de P provenant de l'amendement phosphaté (AP) qui été prélevé par la plante indique que 'elle représente moins de 20 % de P pour les sols de plateau alors qu'elle est 30 à 46 % de P prélevée pour les sols de bas-fond (**Tableau 7**).

**Tableau 7 : Quantité de P (g/kgMS) prélevé par la plante provenant de l'AP après deux cycles de culture**

| Traitements           | Ecologie        |                 |
|-----------------------|-----------------|-----------------|
|                       | Plateau         | Bas-fond        |
| T0 avec NPK           | 0               | 0               |
| T1 100 % RP           | 0,18b (12,5 %)  | 0,26d (19 %)    |
| T2 90 % RP + 10 % TSP | 0,19b (13 %)    | 0,35c (23,9 %)  |
| T3 80 % RP + 20 % TSP | 0,29a (18,70 %) | 0,53b (32,1 %)  |
| T4 60 % RP + 40 % TSP | 0,27a (17,64 %) | 0,97a (46,4 %)  |
| T5 20 % RP + 80 % TSP | 0,03c (2,3 %)   | 0,28d (19,78 %) |
| T6 0 % RP + 100 % TSP | 0,04c (3,07 %)  | 0,05e (4,2 %)   |
| Pr > F                | 0,045           | 0,032           |

*Dans une colonne, les moyennes suivies par une même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman-Keuls au seuil de probabilité de 5 %.*

### 3-5. Fractionnement du phosphore des sols après apport des amendements phosphatés

Après deux cycles de culture sous différents traitements, la teneur en P total (P-total) dans les sols de plateau indique une teneur significativement ( $p < 0,05$ ) plus élevée sous les sols amendés (T1, T2, T3, T4, T5, T6) avec 4500 à 8000 mgP/kg, comparativement aux sols non amendés (T0, T0a) avec 3800 à 4300 mgP/kg (**Tableau 8**). Dans les sols de plateau, la teneur en P-total des sols amendés est significativement plus importante lorsque l'amendement phosphaté (AP) contient au moins 60 % de roche phosphatée (RP) c'est-à-dire sous les traitements T3 et T4. Par ailleurs, l'estimation de la fraction de P lié aux matières organiques (P-org) par rapport au P-total des sols amendés représente 42 et 44 % respectivement sous T3 et T4, comparativement à celle sous le traitement témoin T0 qui est de 19 % par rapport au P-total. De plus, on observe une augmentation plus significative de la fraction P-biodisponible (P-biodis) sous les sols amendés mais avec des proportions plus importantes lorsque l'AP contient plus de 60 à 80 % de RP (T3 et T4) avec 6408,9 à 6680,3 mgP/kg sol sec, comparativement aux traitements T5 et T6 et aux traitements non amendés. Ainsi le P-biodisponible représente 80 à 90 % par rapport au P-total sous les traitements T3 et T4 alors qu'elle est de 23,64 % sous le traitement témoin (T0) (**Tableau 8**). Dans les sols de bas-fond, la teneur en P-total des sols sous différents traitements indique des teneurs plus élevées sous les traitements T4 (9500 mgP/kg sol sec) suivi de T3 (8900 mgP/kg sol sec), comparativement au témoin T0 (5800 mgP/kg sol sec). La fraction de P-org et de P-biodisp par rapport au P-total varie de 45 % à 49% pour la fraction organique et de 55 à 63% pour la fraction biodisponible sous les traitements (T1, T2, T3, T4) (**Tableau 8**).

**Tableau 8 : Teneur en P-total, Pi (P inorganique), P-org (P lié à la matière organique), P-biodisp (P biodisponible) (mg P/kg sol sec) dans les sols**

| Écologie | Forme de P | Traitements (mgP/kg sol sec) |         |          |         |          |         |         |         |
|----------|------------|------------------------------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|---------|
|          |            | T0a                          | T0      | T1       | T2      | T3       | T4      | T5      | T6      |
| Plateau  | P-total    | 3800d                        | 4300c   | 6300b    | 6800b   | 8000a    | 7500a   | 4700c   | 5000c   |
|          | P-i        | 3410b                        | 4272a   | 3979b    | 4340a   | 4580a    | 4192a   | 2770c   | 3140b   |
|          | P-org      | 390e                         | 820d    | 2521b    | 2460b   | 3420a    | 3308a   | 1930c   | 1860c   |
|          | P-biodis   | 540,5e                       | 1016,7d | 4213,01b | 4282,4b | 6408,94a | 6680,3a | 3247,3c | 3128,5c |
| Bas-fond | P-total    | 5600c                        | 5800c   | 6500b    | 6500b   | 8900a    | 9500a   | 6200b   | 6000b   |
|          | P-i        | 4520b                        | 4760b   | 3340c    | 3310c   | 4780a    | 5220a   | 4180b   | 4760b   |
|          | P-org      | 1080d                        | 1040d   | 3160b    | 3190b   | 4120a    | 4280a   | 2020c   | 1240d   |
|          | P-biodis   | 1361,9d                      | 1419,6d | 3655,5b  | 3709,6b | 5334,2a  | 6117,5a | 2900,3c | 1958,8d |

Sur une même ligne, les moyennes suivies par une même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman-Keuls au seuil de probabilité de 5 %.

Dans l'ensemble, quel que soit l'écologie (Plateau ou bas-fond), on note un taux d'augmentation des fractions de P-biodisponible et P-organique des sols amendés (T1, T2, T3, T4, T5, T6) de plus de 150 % par rapport à T0 et une diminution de la fraction inorganique (**Tableau 9**). Toutefois, le taux d'augmentation du P dans les différentes fractions (P-organique et P-biodisponible) par rapport au témoin T0 est significativement plus élevé lorsque l'amendement phosphaté contient plus de 60 % de RP avec 296 à 317 % de P-org et 275 à 557 % de P-biodis (**Tableau 9**).

**Tableau 9 : Taux d'augmentation (%) de la teneur en P dans les différentes fractions (P-total, Pi, P-org, P-biodisp (mg P/kg sol sec) par rapport au témoin T0**

| Écologie | Formes    | Traitements |         |         |         |         |        |
|----------|-----------|-------------|---------|---------|---------|---------|--------|
|          |           | T1          | T2      | T3      | T4      | T5      | T6     |
| Plateau  | P-total   | 46,51b      | 58,14b  | 86,1a   | 74,42a  | 9,30c   | 16,3c  |
|          | P-i       | -6,90d      | 1,59b   | 7,2a    | -1,87c  | -35,2°  | -26,5° |
|          | P-org     | 207,44b     | 200b    | 317,1a  | 303,42a | 135,4c  | 126,8c |
|          | P-biodisp | 314,4b      | 321,21b | 530,4a  | 557,1a  | 219,4c  | 207,7c |
| Bas-fond | P-total   | 12,07b      | 12,07b  | 53,45a  | 63,79a  | 6,90c   | 3,45c  |
|          | P-i       | -29,83°     | -30,46° | 0,42b   | 9,66a   | -12,2d  | -6,30c |
|          | P-org     | 203,85b     | 206,73b | 296,15a | 311,54a | 94,23c  | 19,23d |
|          | P-biodisp | 157,50b     | 161,31b | 275,75a | 330,93a | 104,31c | 37,98d |

Sur une même ligne, les moyennes suivies par une même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman-Keuls au seuil de probabilité de 5 %.

Par ailleurs, l'analyse des différentes formes de P (P-hydrosoluble (P-hydro), P échangeable (P-éch), P lié à l'aluminium (P-Al), au calcium (P-Ca), au fer (P-Fe), à la matière organique (P-org) et P résiduel (P-rési)) des sols sous différents traitements indique une augmentation significative ( $p < 0,05$ ) des proportions de P-éch (207 à 2380 mgP/kg sol), de P-hydro (190,4 à 992,3 mgP/kg sol sec, de P-org (1240 à 4280 mgP/kg sol sec) et de P-Fe (190 à 2180 mgP/kg sol sec pour les sols amendés (T1, T2, T3, T4, T5, T6) quel que soit l'écologie de la parcelle, comparativement au témoin T0 avec P-éch (86 à 192 mgP/kg sol sec), de P-hydro (116,6 à 187,6 mgP/kg sol sec), de P-org (820 à 1040 mgP/kg sol sec) et de P-Fe (530 à 1450 mgP/kg sol sec) (**Tableau 10**). En revanche, on assiste à une diminution significative ( $p < 0,05$ ) de la proportion P-Al (300 à 1300 mgP/kg sol sec), et de P-Ca (130 à 390 mgP/kg sol sec), sous les traitements (T1, T2, T3, T4, T5, T6), comparativement au témoin T0 avec P-Al (1700 à 2100 mgP/kg sol sec), et de P-Ca (245 à 602 mgP/kg sol sec) (**Tableau 10**).

**Tableau 10 : Différentes formes du P (mgP/kg sol sec) dans les sols après l'apport d'AP**

| Écologie | Formes  | T0a    | T0      | T1     | T2     | T3     | T4     | T5     | T6     |
|----------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Plateau  | P-hydro | 90,5e  | 116,66e | 502,1c | 662,4c | 708,9c | 992,3c | 277,3e | 271,5d |
|          | P-éch   | 60f    | 86f     | 1190b  | 1160b  | 2280b  | 2380b  | 1040b  | 997b   |
|          | P-Al    | 1900a  | 2100a   | 1059b  | 1262b  | 776c   | 300d   | 600c   | 970b   |
|          | P-Ca    | 220d   | 245d    | 340e   | 390e   | 150e   | 130e   | 177f   | 192,2e |
|          | P-Fe    | 460c   | 530c    | 450c   | 400d   | 360d   | 190e   | 260e   | 280d   |
|          | P-org   | 390c   | 820b    | 2521a  | 2460a  | 3420a  | 3308a  | 1930a  | 1860a  |
|          | P-resi  | 678b   | 406c    | 438c   | 466d   | 307d   | 199e   | 416d   | 432c   |
| Bas-fond | P-hydro | 177,9d | 187,6e  | 288,5d | 299,6d | 384,2e | 496,5e | 190,3e | 208,8e |
|          | P-éch   | 104d   | 192e    | 207e   | 220e   | 830c   | 1341c  | 530d   | 510d   |
|          | P-Al    | 1800a  | 1700a   | 510c   | 544c   | 600d   | 500d   | 970c   | 1300b  |
|          | P-Ca    | 680c   | 602d    | 250d   | 240e   | 180e   | 200e   | 150e   | 185f   |
|          | P-Fe    | 1150b  | 1450b   | 1745b  | 1700b  | 2180b  | 2130b  | 1688b  | 1750a  |
|          | P-org   | 1080b  | 1040c   | 3160a  | 3190a  | 4120a  | 4280a  | 2020a  | 1240b  |
|          | P-resi  | 610c   | 628d    | 344d   | 308d   | 606d   | 552d   | 492d   | 820c   |

*Dans une colonne de chaque parcelle, les moyennes suivies par une même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman-Keuls au seuil de probabilité de 5 %.*

## 4. Discussion

### 4-1. Influence du pH sur la disponibilité du P dans les sols sous traitements sol

L'évolution du pH des sols amendés a montré une élévation du pH des sols de 1,4 à 2 unités comparativement au sol témoin non amendé où on note une baisse du pH de 0,7 à 1 unité quel que soit l'écologie étudiée avec une plus forte élévation lorsque l'amendement phosphaté contient 60 à 80 % de roche phosphatée du Maroc (RP) c'est-à-dire sous les traitements T3 et T4, comme déjà indiqué dans d'autres études qui ont révélé une augmentation du pH des sols de Dompleu et de Man lycée de la région de Man après l'apport des AP [18]. De même, une élévation du pH des sols après l'apport de roche phosphatée du Mali a été également observé au Mali [19]. Par ailleurs, cette élévation du pH sous les sols amendés s'accompagne aussi d'une hausse de la teneur en P des fractions biodisponibles, organiques et d'une baisse de la fraction inorganique. Notre étude a relevé que l'augmentation du pH du milieu entraîne l'adsorption du phosphore par les composés organiques, conduisant ainsi à une augmentation de la fraction liée aux matières organiques. Parallèlement, cette élévation du pH induit également le relargage du phosphore, de l'aluminium, et du calcium dans le milieu, attribuable à leur utilisation comme accepteurs d'électrons dans le processus de minéralisation. Cette libération de phosphore, d'aluminium, et de calcium peut expliquer à la fois l'élévation du pH d'une part, et justifier la diminution de la fraction liée aux composés inorganiques (P-inorg) d'autre part. En outre, l'application d'amendements phosphatés (AP) a démontré une influence positive sur les fractions biodisponibles et organiques du phosphore, tandis qu'elle a eu un impact négatif sur la fraction inorganique du phosphore dans le sol.

### 4-2. Effet des amendements phosphatés (AP) sur la répartition des différentes formes du P dans les sols

Une augmentation significative ( $p < 0,05$ ) de la teneur en P dans les fractions hydrosolubles (P-hydro), échangeable (P-éch) et organiques (P-org), suite à l'apport d'amendement phosphaté, comparativement au témoin non amendé (T0) quel que soit l'écologie (Plateau ou bas-fond) a été constaté dans cette étude. Par contre, pour les fractions liées à l'aluminium (P-Al) et au calcium (P-Ca), on assiste plutôt à une baisse

significative ( $p < 0,05$ ) de la teneur en P des dites fractions dans le sol. Des résultats similaires ont été obtenus indiquant une la remobilisation de la fraction du P liée à l'aluminium (P-Al) lorsque le pH du milieu augmente ou diminue [20]. Quel que soit l'écologie, l'apport des amendements phosphatés a favorisé un relargage du P par l'aluminium (P-Al) et au calcium (P-Ca) occasionnant donc une baisse des fractions P-Al et P-Ca, comparativement au témoin. Toutefois, pour la fraction liée aux oxydes de fer (P-Fe), il a été constaté une augmentation significative ( $p < 0,05$ ) de la teneur en P de la fraction P-Fe dans les sols de bas-fond, par contre pour les sols de plateau on note plutôt une diminution significative ( $p < 0,05$ ) de la teneur en P de la fraction P-Fe, suite à l'apport d'amendement phosphaté, comparativement au témoin non amendé (T0). Cette remobilisation de la fraction du P lié aux oxydes de fer (P-Fe) qui diffère en fonction de l'écologie de la parcelle (Plateau ou bas-fond) pourrait lier aux conditions redox des milieux (oxydantes au plateau et réductrices dans les bas-fonds). Nos résultats indiquent que la condition réductrice, l'apport d'AP augmente d'adsorption de P par les ions ferreux et par conséquent augmente la fraction liée aux oxydes. Par contre en condition oxydante (plateau), l'apport d'AP réduit l'adsorption de P par les ions ferreux donc également la fraction liée aux oxydes de fer. En effet, en condition réductrices (bas-fond), la teneur en fer ferreux est plus élevée due à la réduction du fer ferrique en fer ferreux. Ce qui va favoriser l'adsorption du P par les ions fer ferreux dans le milieu et par conséquent augmenter la proportion de la fraction P-Fe. Par contre, en conditions moins réducteur donc oxydante, la quantité de fer ferreux est faible donc l'adsorption du P par les ions ferreux est réduite favorisant une réduction de la proportion de la fraction lié aux oxydes de fer. Des résultats similaires ont observé dans les sédiments montrant qu'une baisse du potentiel redox du sédiment provoque le relargage du phosphore et du fer dans le milieu lors des processus de minéralisation et par conséquent une diminution de la proportion de la fraction liée aux oxydes [21]. Des travaux antérieurs ont abordé dans le même sens en montrant que l'AP contribue à améliorer le pH du milieu et par conséquent la disponibilité du P dans le sol en remplaçant les oxydes d'Al et de Fe présent dans le milieu pour libérer les ions phosphatés dans la solution du sol [22].

La concentration élevée de phosphore biodisponible et organique résultant de l'utilisation combinée de roche phosphatée (RP) et de triple superphosphate (TSP) est attribuable à la dissolution de la RP et à la grande solubilité de l'engrais minéral (TSP) dans l'eau. De plus, cette augmentation est également due à la minéralisation de la matière organique, principalement induite par la prolifération des microorganismes présents dans ces environnements. Ces microorganismes ont tendance à se développer en présence d'une forte teneur en matière organique. Cette observation concorde avec les résultats précédents obtenus lors d'études antérieures réalisées en conditions contrôlées dans des batch, utilisant des sols de rizière et des amendements phosphatés (RP/TSP/NPK). Ces études ont révélé la présence significative de microorganismes dans la microflore bactérienne totale des sols, capable de solubiliser le phosphate [2]. La quantification du phosphore prélevé par la plante a révélé que moins de 20 % du phosphore provient de l'amendement phosphaté (AP) dans le cas du plateau, tandis que pour le bas-fond, cette proportion se situe entre 30 et 46 %. Ces résultats concordent avec des recherches antérieures [23] indiquant que 50 à 80 % du phosphore absorbé par la plante pourrait provenir du phosphore insoluble dans le sol. Cela pourrait résulter du relargage de formes de phosphore complexées avec le fer ou l'aluminium dans la solution du sol, de la réduction de l'acidité, ou de l'action des microorganismes rhizosphériques de la plante, qui, par la minéralisation de composés carbonés, augmentent la concentration d'ions phosphatés dans le milieu. Le fait que la majorité du phosphore absorbé par la plante ne provienne pas de l'amendement phosphaté, malgré l'augmentation de la fraction biodisponible résultant de son application sur deux cycles de culture, suggère que la combinaison TSP + RP améliore non seulement les paramètres du sol tels que le pH, mais aussi le phosphore labile et biodisponible du sol. De plus, ces résultats indiquent que l'amendement phosphaté n'a pas été entièrement utilisé après deux années de cultures, laissant également envisager la possibilité d'un troisième cycle de culture sans ajout supplémentaire de phosphore en tant que fertilisant dans le milieu.

## 5. Conclusion

Notre étude met en évidence l'impact significatif de l'augmentation du pH du milieu, induite par l'application d'amendement phosphaté, sur le comportement du phosphore et d'autres éléments associés. L'élévation du pH favorise l'adsorption du phosphore par les composés organiques, augmentant la fraction liée aux matières organiques, tandis que le relargage du phosphore, de l'aluminium et du calcium dans le milieu contribue à l'élévation du pH et à la diminution de la fraction liée aux composés inorganiques (P-inorg). En outre, nous observons une influence positive sur les fractions biodisponibles (hydrosolubles, échangeables, et organiques) du phosphore suite à l'utilisation d'amendements phosphatés. Cependant, il est important de noter que cette amélioration s'accompagne d'un impact négatif sur la fraction inorganique (liée à l'aluminium et au calcium) du phosphore dans le sol. En somme, ces résultats soulignent la complexité des interactions entre le pH, les composés organiques et inorganiques, et l'effet spécifique des amendements phosphatés sur la dynamique du phosphore dans le sol. Cette compréhension approfondie est cruciale pour le développement de pratiques agricoles durables et la gestion efficace des ressources du sol.

## 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 Man (CNRA), a pu être réalisée grâce à la collaboration de la station de recherche CNRA, qui a généreusement mis à notre disposition des parcelles rizicoles pour la mise en place des expérimentations.*

## Références

- [1] - K. L. SAHRAWAT, M. JONES, S. DIATTA and A. ADAM, " Response of Upland Rice to fertilizer Phosphorus and its Residual Value in an Ultisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32 (15 - 16) (2001) 2457 - 2468. DOI: 10.1081/CSS-120000384
- [2] - W. H. KPAN, A. J. BONGOYA-DEVISME, K.-K. H. KOUADIO, B. KONE and F. M. L. BAHAN, "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) (2023) 135 - 144. DOI: 10.22161/ijeeab.85.18
- [3] - V. KOTCHI, A. Y. KOUAME et S. DIATTA, " 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)", *Journal of Applied Biosciences*, 31 (2010) 1895 - 1905. <http://m.elewa.org/JABS/2010/31/3.pdf>
- [4] - A. TOURE, D. SORO, H. K.-K. KOUADIO, S. BAKAYOKO and T. KONE, "Influence of agricultural residues on some physical parameters of the soil fertility under eggplant cultivation", *GPH-International Journal of Agriculture and Research*, 5 (12) (2022) 09 - 23. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7497060>
- [5] - B. KONE, J. B. ETTIEN, G. L. AMADJI, S. DIATTA et M. CAMARA, " Effets d'engrais phosphatés de différentes origines sur la production rizicole pluviale sur 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*, 22 (1) (2010) 55 - 63
- [6] - O. D. B. BIAOU, A. SAIDOU, F. X. BACHABI, G. E. PADONOU et I. BALOGOUN, "Effet de l'apport de différents types d'engrais organiques sur la fertilité du sol et la production de la carotte (*Daucus*

- carota L.) sur sol ferrallitique au sud Bénin", *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11 (5) (2017) 2315 - 2326. [10.4314/ijbcs.v11i5.29](https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i5.29)
- [7] - J. B. G. GNAHOUA, M. L. M. S. OUATTARA, Z. COULIBALI, L. B. DIOMANDÉ, Y. R. SORO, "Integrated Soil Fertility Management: A Promising Pathway for Sustainable Intensification of Smallholder Cotton Farming Systems in Côte d'Ivoire", *Asian Journal of Research in Crop Science*, 8 (1) (2023) 51 - 58
- [8] - G. AGEGNEHU, T. AMEDE, T. ERKOSSA, C. YIRGA, C. HENRY, R. TYLER and, G. W. SILESHI, "Extent and management of acid soils for sustainable crop production system in the tropical agroecosystems: a review", *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 71 (9) (2021) 852 - 869. <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1954239>
- [9] - S. A. GRAHAM, C. B. CRAFT, P. V. MCCORMICK and A. ALDOUS, "Forms and accumulation of soil P in natural and recently restored peatlands-upper Klamath Lake, Oregon, USA" *Wetlands*, 25 (2005) 594 - 606. DOI: [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2005\)025\[0594:FAAOSP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2005)025[0594:FAAOSP]2.0.CO;2)
- [10] - S. PORDER et O. A. CHADWICK, "Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions Understanding controls on tropical nitrogen dynamics in heterogenous terrain View project Luquillo Critical Zone Observatory View project", *Ecological Applications*, 20 (1) (2010) 5 - 15. <https://doi.org/10.1890/08-0127.1>
- [11] - J. H. ANDRIAMANIRAKA, "Etude et modélisation de la biodisponibilité du phosphore dans un sol cultivé de Madagascar en fonction des pratiques culturales", Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo, (2009) 169 p.
- [12] - M. K. ABBASI, N. MUSA et M. MANZOOR, "Mineralization of soluble P fertilizers and insoluble rock phosphate in response to phosphate-solubilizing bacteria and poultry manure and their effect on the growth and P utilization efficiency of chilli (*Capsicum annuum* L.)", *Biogeosciences*, 12 (15) (2015) 4607 - 4619. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4607-2015>
- [13] - Z. KHAN, C. MIDEGA et L. WADHAMS, "Évaluation de variétés de graminées napier (*Pennisetum purpureum*) à utiliser comme plantes pièges pour la gestion du foreur des tiges africain (*Busseola fusca*) dans une stratégie push-pull", *Entomologia*, (2007) 201 - 211 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1570-7458.2007.00569.x>
- [14] - P. MEHTA, A. WALIA, K. SAURABH, "Efficiency of plant growth promoting P-solubilizing *Bacillus circulans* CB7 for enhancement of tomato growth under net house conditions". *Wiley Online Library*, 55 (1) (2015) 33 - 44. <https://doi.org/10.1002/jobm.201300562>
- [15] - P. V. STRAATEN, Agriculture avec des roches et des minéraux, dans : R. Koy Kasongo, étude et Gestion des Sols, 17 (1) (2006) 2010 - 47-58
- [16] - A. BADO, V. B. et V. HIEN, Efficacité agronomique des phosphates naturels du Burkina Faso sur le riz pluvial en sol ferrallitique. Cahiers d'études et de Recherches Francophones, *Agricultures*, 7 (3) (1998) 235 - 238. <https://revues.cirad.fr/index.php/cahiers-agricultures/article/view/30093>
- [17] - V. MESNAGE et B. PICOT, Comparaison de deux méthodes d'extractions sélectives pour évaluer la mobilité des phosphates des de lagunes littorales. *Journal Français d'Hydrologie*, 24 (1993) 55 - 68
- [18] - T. J-N KOFFI, Etude des arrières effets des différentes fumures phosphatées après deux cycles de culture sur le rendement du riz irrigué : cas des parcelles rizicoles de Man. Mémoire, Université Felix Houphouet Boigny, Cocody, (2020) 41 p.
- [19] - E. ZAPATA et R. N. ROY, "Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable", *Bulletin FAO : engrais et nutrition végétale*, 13 (2004) 25 - 29
- [20] - W. K. CHOUTI, W. ATCHICHOE, L. TOMETIN, M. J. DAOUDA, "Biodisponibilité et mobilité du phosphore des sédiments de la lagune de Porto-Novo", *Journal of Applied Biosciences*, 114 (2017) 11276 - 11288

- [21] - M. TAOUFIK et J. E. DAFIR, "Comportement du phosphore dans le sédiment des barrages de la partie aval du bassin versant d'Oum Rabiaa (Maroc)". *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 15 (1) (2002) 235 - 249. <https://doi.org/10.7202/705449ar>
- [22] - T. V. OUATTARA, K. E. KASSIN, L. J. KOKO, G. N. TAHI, M. E. ASSI, G. AMARI, E. DICK, M. CAMARA, " Effets de la fertilisation organo-phosphatée sur la biodisponibilité du phosphore, la teneur en aluminium et le pH des sols sous cacaoyers dans de Divo en Côte d'ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 118 (2017) 11754 - 11767
- [23] - C. NOBILE, M. BRAVIN, E. TILLARD, T. BECQUER and J-M. PAILLAT, " Phosphorus sorption capacity and availability along a toposequence of agricultural soils: effects of soil type and a decade of fertilizer applications". *Soil Use and Management*, 34 (4) (2018) 461 - 471, <https://doi.org/10.1111/sum.12457>