

## Évaluation de l'efficacité des boues d'alun des usines de production d'eau potable à éliminer le phosphore dans les eaux usées

### [ Evaluation of the effectiveness of alum sludge from drinking water treatment plant for phosphorus removal in wastewater ]

*Seyhi Brahim, Franck Maxime Gnamba, Yao Salomon Kouakou, and Bolou Golé Esaïe Georges*

Département de Géosciences, UFR des Sciences Biologiques, Université Peleforo Gon Coulibaly, BP 1328 Korhogo, 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:** Sludge produced in drinking water treatment plants (DWTP) is discharged into environment every day, even they are rich in phosphorus-reactive elements. The objective of this study was to evaluate the removal of phosphorus using sludge from DWTP of the city of Sinematiali (Côte d'Ivoire). The sludge was packaged in granules and put in contact in beaker with synthetic water et effluent from domestic wastewater treatment plant. The results demonstrated that the sludge was rich in aluminum ( $307.6 \pm 0.6$  g/kg) and iron ( $208.7 \pm 1.2$  g/kg), two phosphorus removal agents. Phosphorus removal was described mainly by adsorption process, which equilibrium was reached after 4 h of contact time at pH 5. Removal of phosphorus from wastewater was around 70% in synthetic wastewater and 42.5% in real wastewater. Removal rate was enhanced when the sludge dosing increased from 10 to 40 g/l, from 42.5 to 87.5%. The adsorption of phosphorus is described by the Langmuir isotherm with  $q_m = 1.72$  mg/g and kinetic removal followed pseudo-order 2 model ( $k_2 = 0.023$  g/mg.min). Sludge from DWTP of Sinematiali demonstrated good phosphorus removal potential.

**KEYWORDS:** Alum sludge, Phosphorus removal, Adsorption isotherms, Adsorption kinetics, Korhogo.

**RESUME:** Les boues produites dans les usines de production de l'eau potable (UPEP) sont déversées chaque jour dans l'environnement, pourtant elles sont riches en éléments réactifs au phosphore. La présente étude a eu pour objectif d'évaluer l'élimination du phosphore dans les boues de l'UPEP d'une ville de Côte d'Ivoire (Sinematiali). Les résultats de caractérisation physico-chimiques ont démontré que les boues de UPEP de Sinematiali sont riches en aluminium ( $307,6 \pm 0,6$  g/kg) et en fer ( $208,7 \pm 1,2$  g/kg), deux éléments déphosphatants. Elles ont été conditionnées en granules et mise en contact dans un premier temps avec une eau synthétique, puis sur une réelle issue d'une station de traitement des boues de vidange (STBV). Les résultats ont démontré que l'élimination du phosphore se fait principalement par adsorption. Elle atteint son équilibre après 4 h de contact et à pH 5. L'élimination du phosphore dans les boues de l'UPEP de Sinematiali a avoisinée 70% pour ce qui concerne le traitement d'eau synthétique et 42,5% pour l'effluent de la STBV. Cette performance a été rehaussée lorsque la dose de boues est majorée, passant de 42,5% (à 10 g/l) à 87,5% (à 40 g/l). L'adsorption du phosphore est parfaitement décrite par l'isotherme de Langmuir avec  $q_m = 1,72$  mg/g et une cinétique de pseudo-ordre 2 ( $k_2 = 0,023$  g/mg.min). Les boues testées ont un bon potentiel d'élimination du phosphore dans les eaux réelles.

**MOTS-CLEFS:** Boues d'alun; élimination du phosphore, isothermes d'adsorption; cinétique d'adsorption, Korhogo.

## 1 INTRODUCTION

Le phosphore est un élément chimique essentiel à la vie. Il joue un rôle important dans la croissance des plantes, le processus de synthèse des protéines, le cycle de production d'énergies dans les cellules, la formation des os et des tissus nerveux, et bien d'autres [1]. Le phosphore est le premier facteur limitant de la croissance algale. De ce fait, il est à l'origine de l'eutrophisation des plans d'eau, la prolifération des algues bleu-vert (cyanobactéries) et dans une certaine mesure, la perte de biodiversité aquatique ([2], [3]). La présence du phosphore dans les plans d'eau est liée à son rejet via les eaux usées non traitées ou insuffisamment traitées, l'utilisation des engrais

en agriculture, les rejets d'élevage, etc. Son traitement peut être réalisé à l'aide des méthodes de traitement physique, physico-chimique (précipitation chimique ou échange d'ions) et/ou biologique des eaux [4]. Les méthodes de traitement physique sont essentiellement efficaces pour éliminer le phosphore particulaire [4], tandis que les méthodes physico-chimiques et biologiques visent à la fois, le phosphore particulaire et le phosphore dissous. Cependant les méthodes physico-chimiques et biologiques usuelles sont généralement onéreuses et particulièrement difficiles à mettre en œuvre dans le contexte des pays en développement ou de petites localités. En effet, elles sont associées à des besoins non négligeables d'opération et d'entretien réguliers, l'utilisation d'équipements spécialisés, une grande consommation énergétique et une importante production de boues [5]. Une alternative intéressante serait les techniques de traitement dites « passives », utilisant des matériaux à fort pouvoir d'adsorption et/ou de précipitation, et ne nécessitant pas un besoin d'opération et d'entretien réguliers ou l'utilisation d'équipements énergivores. En général, les matériaux utilisés sont moins chers et accessibles. Ils sont utilisés comme supports de filtration gravitaire ([6], [7], [8]; [9], [2]). Les boues des unités de production d'eau potable (UPEP) en sont un exemple typique qui pourrait avoir un fort pouvoir d'adsorption et/ou de précipitation, à cause des éléments chimiques qu'elles contiennent. Ces boues sont issues de l'étape de la coagulation chimique et de l'utilisation de la chaux dans les UPEPs, donc contiennent des éléments chimiques, tels que le Fer, l'aluminium et le calcium, qui sont reconnus réactifs au phosphore. Dans les pays en développement, les boues d'UPEPs sont rejetées directement dans l'environnement sans aucun traitement. En Côte d'Ivoire, la quantité de boues d'UPEPs rejetées dans l'environnement au cours de l'année 2018, peut être estimée entre 2 635 580 m<sup>3</sup> – 7 906 740 m<sup>3</sup> [10]. Ces rejets créent au fil du temps d'énormes problèmes environnementaux, tels que l'envasement des plans d'eau, la disparition de certains biotopes aquatiques, la présence d'éléments traces métalliques dans les plans d'eau, etc. La littérature rapporte que la valorisation des boues d'UPEPs dans le traitement des eaux usées est possible ([11], [12], [13]). Cependant, elle est intrinsèquement liée aux caractéristiques des boues, qui elles-mêmes dépendent de la qualité de l'eau brute traitée, la pureté et la qualité des coagulants et autres produits chimiques utilisés pour le traitement (chaux, charbon actif, floculants), ainsi que des conditions opératoires, etc. ([11], [8]). Par conséquent, les caractéristiques des boues d'UPEPs peuvent varier d'un pays à un autre, d'une région à une autre, d'une ville à une autre, d'un endroit à un autre, d'une UPEP à une autre, etc. Pour une valorisation optimale de ces boues, la connaissance de leur composition et la réalisation d'essais d'évaluation de leur potentiel à éliminer le phosphore sont essentielles. La présente étude s'inscrit dans cette dynamique et a pour objectif principal de connaître la composition physico-chimique des boues de l'UPEP de Sinematiali, et d'évaluer leur potentiel à éliminer le phosphore. Par ailleurs, elle permet de comprendre les mécanismes inhérents au processus d'élimination du phosphore dans les boues et de modéliser le principal mécanisme (l'adsorption) à l'aide de modèles mathématiques non complexes.

## 2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 2.1 SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE L'UPEP

Les boues utilisées dans la présente étude sont issues de l'UPEP de Sinematiali, située au nord de la Côte d'Ivoire (9°35' N, 5°23' O), dont la prise d'eau se fait au niveau du fleuve Bandama. Cette station alimente en eau potable les villes de Sinématiali, Ferkessédougou et Korhogo. L'usine comprend une (1) unité de coagulation-floculation, cinq (5) décanteurs, cinq (5) unités de filtration sur sable, et une unité de désinfection au chlore, avec un débit d'eau brute pompée s'élevant à 15 000 m<sup>3</sup>/j. Les produits chimiques utilisés sont: i) le sulfate d'alumine ou alun pour la coagulation-floculation, ii) la chaux pour la neutralisation du pH, et iii) l'hypochlorite de sodium pour la désinfection. Au total près de 184,3 m<sup>3</sup> de boues sont rejetées par jour dans l'environnement, soit environ 67 269, 5 m<sup>3</sup> de boues par an.

### 2.2 ÉCHANTILLONNAGE ET CONDITIONNEMENT DES BOUES

L'échantillonnage des boues s'est fait au niveau de la ligne de purge collective des décanteurs de l'UPEP. Environ 20 l de boues liquides ont été échantillonnés dans un contenant plastique (chaudière) et conservés à 4 °C. Au total, deux campagnes d'échantillonnage ont été réalisées. Les analyses de caractérisation des boues ont été faites le jour même de l'échantillonnage et les boues ont été déshydratées, transformées en granules, puis séchées. Le séchage a été réalisé dans un four enterré chauffée au feu de bois (3h).

### 2.3 MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Les essais d'évaluation des performances des boues ont été réalisés en béchers sur une rampe de jar-test à 6 positions. Ces essais ont consisté à mettre en contact 250 ml d'une solution synthétique d'orthophosphates avec différentes masses de granules de boues. L'ensemble a été mis sous une agitation de 150 tr/min à 20 – 23 °C. La vitesse d'agitation de 150 tr/min a été choisie, vu qu'elle permet de réaliser une bonne homogénéisation des béchers ([14], [15]).

### 2.4 ESSAIS PRÉLIMINAIRES

La série d'essais préliminaires a consisté à évaluer de manière grossière le potentiel d'élimination du phosphore sur les boues conditionnées de l'UPEP de Sinematiali et de déterminer les principales voies réactionnelles. Pour ce faire, un volume de 250 ml d'eau synthétique à 5 mgP/l a été mis en contact avec à 10 g/l de granules de boues déshydratées et séchées. L'ensemble a été mis sous une

agitation de 150 tr/min à 20 – 23 °C, pendant une période de 14 h, sans ajustement du pH initial. À un intervalle de temps régulier (0,5, 1, 2, 4, 6, 8, 10 h), des échantillons ont été retirés, filtrés et des analyses ont été effectuées sur la phase liquide, conformément à des méthodes approuvées ([14], [15]).

## 2.5 ÉVALUATION DE L'EFFET DU PH INITIAL SUR LES PERFORMANCES D'ÉLIMINATION DU PHOSPHORE

La deuxième série d'essais a consisté à évaluer l'effet du pH initial de l'eau sur les performances d'élimination du phosphore. Pour ce faire, un volume de 250 ml d'eau synthétique à 5 mgP/l a été mis en contact avec 10 g/l des granules de boues déshydratées et séchées. L'ensemble a été mis sous une agitation de 150 tr/min à 20 – 23 °C, pendant une période de 4 h. Le temps de contact a été fixé sur la base des résultats des essais préliminaires. Différentes valeurs de pH initial ont été testées (3,0, 4,9, 7,0, 9,0, 10,0). Ensuite, les échantillons ont été filtrés et des analyses ont été effectuées sur la phase liquide, conformément à des méthodes approuvées ([14], [15]).

## 2.6 DÉTERMINATION DES ISOTHERMES

La troisième série d'essais a consisté à déterminer les isothermes du processus d'élimination du phosphore. Pour ce faire, un volume de 250 ml d'eau synthétique à différentes concentrations de phosphore (1 – 18,2 mg P/l) a été mis en contact avec 10 g/l des granules de boues déshydratées et séchées. L'ensemble a été mis sous une agitation de 150 tr/min à 20 – 23 °C et un pH de 4,9, pendant une période de 4 h. Ensuite, les échantillons ont été filtrés et des analyses ont été effectuées sur la phase liquide, conformément à des méthodes approuvées ([14], [15]).

Deux modèles mathématiques d'isothermes d'adsorption (Freundlich et Langmuir) ont été testés, afin de déterminer certains paramètres inhérents à l'adsorption du phosphore.

Le modèle de Freundlich est décrit par l'équation 1:

$$q_e = k_f * C_e^{\frac{1}{n}} \quad \text{Éq.1}$$

$n$  est l'exposant de Freundlich et  $k_f$  est la constante de Freundlich.

Le modèle de Langmuir est décrit par l'équation 2:

$$q_e = \frac{K_L C_e}{1 + b C_e} \quad \text{Éq.2}$$

Dans cette équation,  $q_e$  (mg/g) est la quantité de phosphore adsorbée à l'équilibre par gramme de boues.  $C_e$  (mg/l) est la concentration résiduelle de phosphore à l'équilibre, en phase liquide.  $K_L$  (l/g) et  $b$  (l/mg) sont les constantes de Langmuir.

À partir des constantes  $K_L$  (l/g) et  $b$  (l/mg) de Langmuir, on déduit la constante adimensionnelle ( $R_L$ ) (équation 3). Cette constante adimensionnelle permet de prédire si l'adsorption est favorable ou non ([16], [17]).

$$R_L = \frac{1}{1 + b C_0} \quad \text{Éq.3}$$

## 2.7 ÉTUDE CINÉTIQUE

La quatrième série d'essais a consisté à déterminer la cinétique d'élimination du phosphore sur les boues d'UPEP. Pour ce faire, un volume de 250 ml d'eau synthétique à 5 mgP/l a été mis en contact avec 10 g/l des granules de boues déshydratées et séchées. L'ensemble a été mis sous une agitation de 150 tr/min à 20 – 23 °C et un pH de 5 pendant une période de 4 h. À un intervalle de temps régulier (30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240 min), les échantillons ont été retirés, filtrés et des analyses ont été effectuées sur la phase liquide ([14], [15]).

Les données expérimentales décrivant la cinétique d'élimination du phosphore sur les boues sont présentées à la figure 4. Ces données ont été modélisées à l'aide des modèles cinétiques de pseudo ordre 1 et de pseudo ordre 2.

Deux modèles cinétiques ont été testés: pseudo-ordre 1 et pseudo-ordre 2. Le modèle de pseudo-ordre 1 est basé sur l'hypothèse que la vitesse réactionnelle est proportionnelle au nombre de sites de fixation disponible. Il est décrit par l'équation 4 ([18], [19]):

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad \text{Éq.4}$$

Où,  $k_1$  représente la constante cinétique de pseudo ordre 1 (1/min),  $q_e$  (mg/g) est la quantité de phosphore adsorbée à l'équilibre par unité de gramme de boue, et  $q_t$  (mg/g) est la quantité de phosphore adsorbée en un instant  $t$  quelconque.

Le modèle de pseudo-ordre 2 est quant à lui décrit par l'équation 5:

$$\frac{dt_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad \text{Éq.5}$$

Où,  $k_2$  (g/mg.g) est la constante cinétique de pseudo-ordre 2,  $q_e$  (mg/g) est la quantité de phosphore adsorbée à l'équilibre par unité de gramme de boue, et  $q_t$  (mg/g) est la quantité de phosphore adsorbée à un instant  $t$  quelconque.

## 2.8 ESSAIS EN EAU RÉELLE

La cinquième série d'essais a consisté à évaluer les performances de traitement d'eau réelle. L'eau a été collectée à la sortie de la station de traitement des boues de vidange (STBV) de la ville de Korhogo (Côte d'Ivoire). La ville de Korhogo est située au nord de la Côte d'Ivoire à environ 30 km de la ville de Sinematiali. La STBV de Korhogo reçoit les boues de fosses septiques de la ville de Korhogo. Dans un premier temps, un volume de 250 ml d'eau réelle a été mis en contact avec 10 g/l des granules de boues déshydratées et séchées. L'ensemble a été mis sous une agitation de 150 tr/min à 20 – 23 °C pendant une période de 4 h. Deux scénarii ont été testés: i) pas d'ajustement du pH initial; ii) ajustement du pH initial à 5). Ensuite, les échantillons ont été filtrés et des analyses ont été effectuées sur la phase liquide conformément à des méthodes approuvées ([14], [15]). Dans un deuxième temps, des essais ont été réalisés en augmentant la masse de boues de 10 à 40 g/l, à pH 5. Après agitation, les échantillons ont été filtrés et des analyses ont été effectuées sur la phase liquide, conformément à des méthodes approuvées ([14], [15]).

## 2.9 MÉTHODES ANALYTIQUES

### 2.9.1 MESURE DU PH ET DE LA TURBIDITE

Un pH-mètre (pH meter/Ion meter Acumet excel XL2, modèle S/N XL 94005507, Fisher Scientific Co.) équipé d'une électrode Cole-Palmer à double jonction (référence Ag/AgCl) a servi à la mesure du pH et un thermomètre pour la mesure de la température des échantillons. Un turbidimètre (Hach, 2100Q) a servi à la mesure de la turbidité.

### 2.9.2 ANALYSE DES SOLIDES TOTAUX ET SICCITES

Des analyses de solides totaux et siccités ont été réalisées sur des échantillons de boues fraîches homogénéisées. Les analyses ont été réalisées conformément à la méthode MA100ST11-2 du centre d'expertise en analyses environnementales du Québec (CEAEQ) [20].

### 2.9.3 ANALYSE DES MÉTAUX

Les analyses de métaux (fer, aluminium et magnésium) ont été réalisées sur des échantillons de boues séchées et broyées à l'aide d'un mortier. 0,5 g d'échantillon de boues a été minéralisé par ajout d'acide nitrique et d'acide chlorhydrique dans les proportions 1: 3 (V: V). L'échantillon a été ensuite chauffé dans un bain marie à 100°C, pendant 1 heure et laissé refroidi à température ambiante. Finalement, 25 ml d'eau bi-distillée ont été ajoutées à l'échantillon, puis le tout a été filtré sur un filtre wattman dans une éprouvette de 50 ml, et complété à 50 ml avec de l'eau bi-distillée. Le filtrat a été prélevé pour une analyse de Fe, Al et Mg, à l'aide d'un spectrophotomètre d'adsorption atomique (Shimadzu, AA-7000).

### 2.9.4 ANALYSE DU PHOSPHORE ET DU CALCIUM

L'analyse du phosphore en phase liquide s'est faite à l'aide d'un spectromètre (HACH, DR1900), conformément à la méthode 8048 (PhosVer 3<sup>®</sup>, (Ascorbic Acid) Method). Le phosphore analysé est la forme P-PO<sub>4</sub>.

Les analyses de calcium et de phosphore dans la boue ont été réalisées sur des échantillons de boues séchées et broyées à l'aide d'un mortier. 5 g de boues ont été calcinées au four à moufle pendant 4 h. À la sortie du four, la boue a été refroidie, puis 5 ml d'acide sulfurique et 25 ml d'eau bi-distillée ont été ajoutés. Finalement, 25 ml ont été filtrés sur un filtre wattman dans une éprouvette de 50 ml, et complété à 50 ml avec de l'eau bi-distillée. Le filtrat a été prélevé pour les analyses de calcium et phosphore, respectivement avec un photomètre à flamme (BWP-XP) et un spectromètre UV (VWR, UV-6300PC).

### 3 RÉSULTATS

#### 3.1 COMPOSITION PHYSICO-CHEMIQUE DES BOUES DE L'UPEP DE SINEMATIALI

Les résultats de l'analyse de caractérisation physico-chimique des boues issues de l'UPEP de Sinématiali sont présentés au tableau 1. Les boues ont un pH quasi neutre, ( $\text{pH} = 7,11 \pm 0,0$ ). Les concentrations de solides totaux (ST) sont de l'ordre de  $23,5 \pm 8,5 \text{ g/L}$  et la siccité des boues est de  $2,6 \pm 0,9 \%$ . Ces boues sont liquides et contiennent les éléments chimiques tels que l'aluminium ( $307,6 \pm 0,6 \text{ g/kg}$ ), le Fer ( $208,7 \pm 1,2 \text{ g/kg}$ ), le calcium ( $9,3 \pm 0,0 \text{ g/kg Ca}$ ) et le magnésium ( $15,0 \pm 0,1 \text{ g/kg}$ ), connus pour avoir un fort potentiel pour l'élimination du phosphore. Elles sont quasi exemptes de phosphore ( $0,7 \pm 0,0 \text{ g/kg}$ ).

Tableau 1. Composition physico-chimique des boues de l'UPEP de Sinématiali

Paramètres	Valeurs
pH	$7,11 \pm 0,04$
Solide totaux (ST, g/l)	$23,5 \pm 8,5$
Humidité (%)	$97,4 \pm 0,9$
Siccité (%)	$2,6 \pm 0,9$
Calcium (g/kg)	$9,3 \pm 0,0$
Fer (g/kg)	$208,7 \pm 1,2$
Aluminium (g/kg)	$307,6 \pm 0,6$
Phosphore (g/kg)	$0,7 \pm 0,0$
Magnésium (g/kg)	$15,0 \pm 0,1$

#### 3.2 APTITUDE DES BOUES À ÉLIMINER LE PHOSPHORE

Les boues conditionnées (séchage et granulation) sont capables d'éliminer de manière significative le phosphore (Figure 1). L'élimination du phosphore suit deux phases principales: i) une première dure 4 h au cours de laquelle un taux d'élimination de  $\text{P-PO}_4^{3-}$  allant jusqu'à 70% est observé. Ce qui fait passer la concentration de phosphore en solution de  $5 \text{ mgP/l}$  à  $1,5 \text{ mgP/l}$ . La seconde phase est caractérisée par une faible évolution de la concentration de  $\text{P-PO}_4^{3-}$  en solution, soit de  $1,5 \text{ mg/l}$  à  $0,6 \text{ mg/l}$  pendant 6h. Ce qui correspond à environ 18% de taux d'élimination. La suite de l'étude a donc été focalisée sur la phase majeure, à savoir la première phase. Celle-ci s'apparente à un processus d'adsorption du phosphore, tandis que la deuxième phase serait la précipitation chimique du phosphore par des ions tels que  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  qui se retrouvent en solution par suite de la friction des boues.

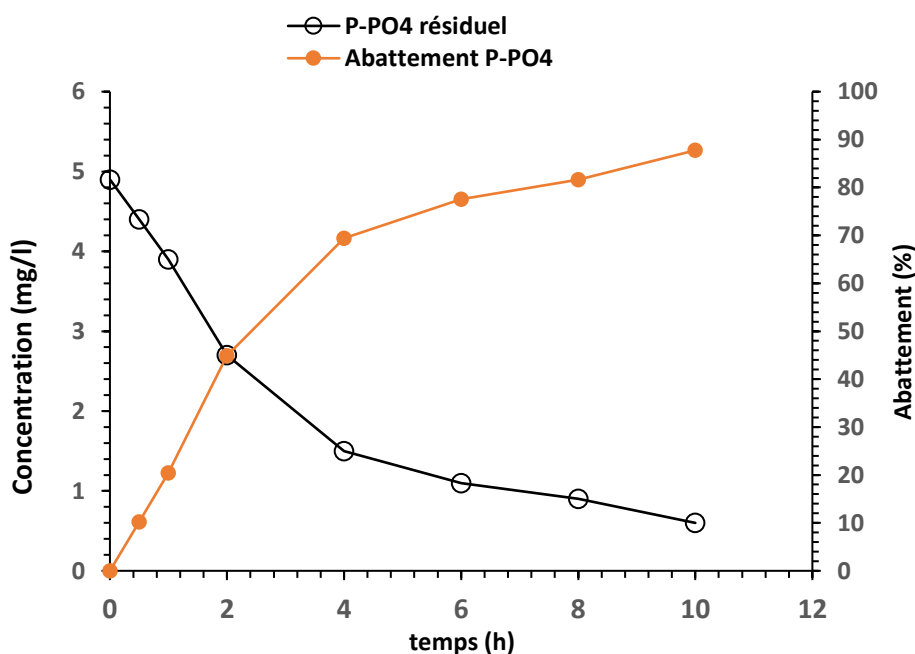


Fig. 1. Aptitude des boues à éliminer le phosphore au cours du temps (Eau synthétique, [Boue] = 10g/L; vitesse d'agitation = 150 tr/min)

3.3 EFFET DU PH SUR LES PERFORMANCES

L'évolution des performances d'élimination du phosphore sous l'effet du pH initial est présentée à la figure 2. On observe que le pH initial de la solution affecte l'élimination du phosphore. Le taux d'élimination du phosphore croît pour le niveau le plus élevé à pH 5, puis diminue lorsque le pH passe en dessous de 5 et au-dessus de 5. Le taux maximal d'élimination du phosphore de 70% est atteint à pH = 5. Ce taux d'élimination diminue à 24% à pH = 3. Lorsque le pH augmente au-delà de 5 (pH > 5), le taux d'élimination du phosphore diminue graduellement avec l'augmentation du pH, pour atteindre 30,6% à pH = 10. On en déduit que le pH optimal pour l'élimination du phosphore sur les boues de l'UPEP de Sinematilai est de 5. Pour la suite de l'étude, le pH a été fixé à 5.

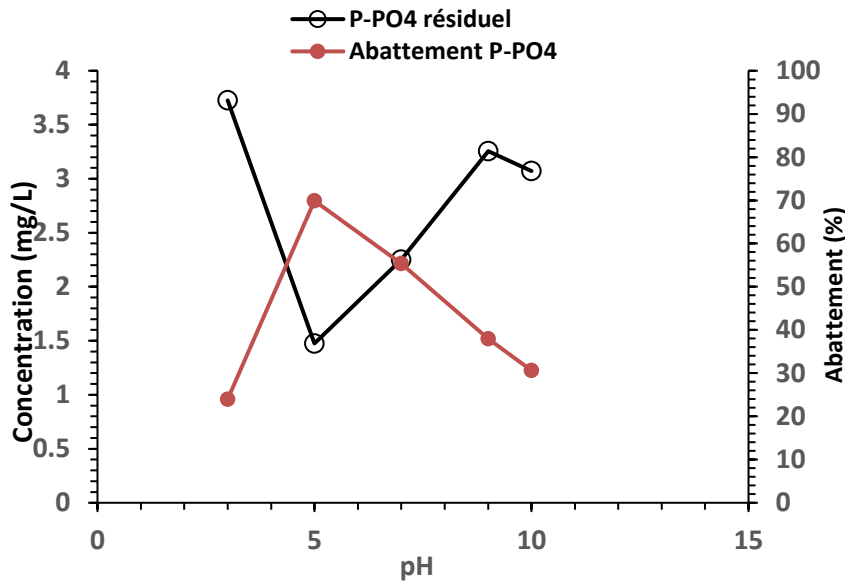


Fig. 2. Évolution du phosphore résiduel en fonction du pH ([P-PO4= 5mg/L; [Boue] =10 g/L; temps de contact = 4h; vitesse d'agitation = 150 tr/min)

3.4 ISOTHERMES D'ADSORPTION DU PHOSPHORE

Les données expérimentales d'adsorption ont été reliées aux modèles mathématiques d'isothermes de Freundlich et Langmuir. Les coefficients des équations décrivant les modèles de Langmuir et de Freundlich sont résumés au tableau 2 et la figure 3 présente les représentations graphiques des modèles d'isothermes par rapport aux données expérimentales. Les deux modèles testés décrivent bien les isothermes d'élimination du phosphore, avec des coefficients de détermination de R<sup>2</sup> = 0,985 pour le modèle de Langmuir et R<sup>2</sup> = 0,962 pour le modèle de Freundlich. La capacité maximale d'élimination du phosphore (q<sub>m</sub>) sur les boues de l'UPEP de Sinematilai (q<sub>m</sub>) est de 1,720 mg/g. La constante R<sub>L</sub> a une valeur de 0,149 ± 0,14. Elle est adimensionnelle.

Tableau 2. Paramètres d'équilibre des isothermes d'adsorption du phosphore

Isothermes	Équations	Paramètres	Valeurs	R <sup>2</sup>
Freundlich	$q_e = k_f * C_e^{1/n}$	$k_f (mg^{(1-1/n)} \cdot L^{1/n} / g)$	0,285	0,963
		Log k <sub>f</sub>	-0,545	
		n	3,175	
		n <sup>-1</sup>	0,315	
Langmuir	$q_e = \frac{K_L * C_e}{1 + b * C_e}$	q <sub>m</sub> (mg/g)	1,721	0,985
		b(mg/L)	1,186	
		K <sub>L</sub> (L/g)	0,689	
		R <sub>L</sub>	0,149 ± 0,14	

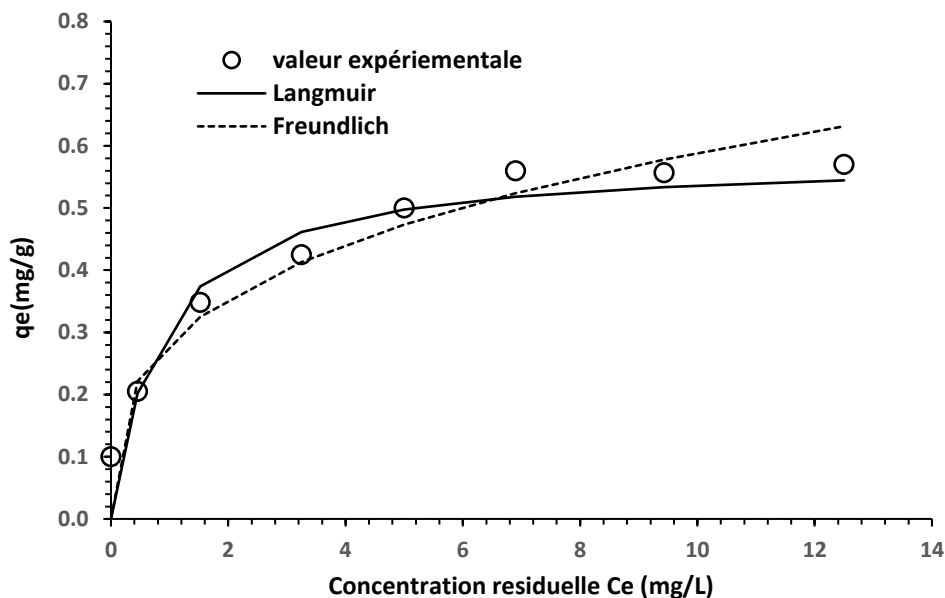


Fig. 3. Isothermes d'adsorption ( $V=250$  ml;  $C_b=10$  g/l; temps de contact =4 h;  $pH=5$ ; agitation: 150 tr/min)

### 3.5 CINÉTIQUE D'ADSORPTION DU PHOSPHORE

Les données expérimentales décrivant la cinétique d'adsorption du phosphore sur les boues sont présentées à la figure 4 et les coefficients des modèles cinétiques testés sont présentés au tableau 3. Les deux modèles testés décrivent bien la cinétique d'adsorption du phosphore, avec un coefficient de détermination  $R^2 = 0,963$  pour le pseudo ordre 2,  $R^2 = 0,935$  pour le modèle pseudo-ordre 1.

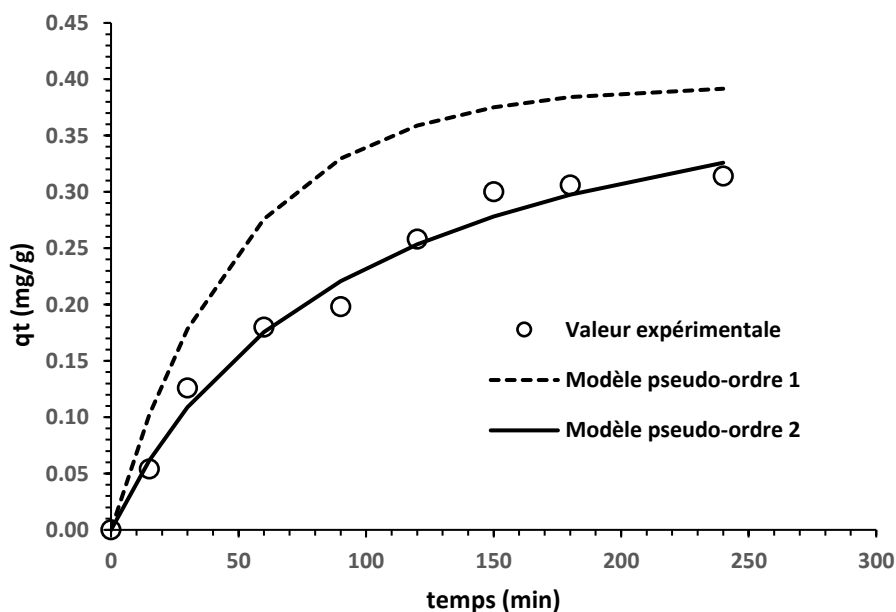


Fig. 4. Représentation graphique des modèles cinétiques d'adsorption du phosphore

Tableau 3. Paramètres cinétiques d'adsorption du phosphore

Modèles	Équations	Paramètres	Valeurs	$R^2$
Pseudo ordre 1	$\frac{dq_t}{dt} = k_1 * (q_e - q_t)$	$q_e$ (mg/g) $K_1$ (g/mg.min)	0,394 0,020	0,935
Pseudo ordre 2	$\frac{dq_t}{dt} = k_2 * (q_e - q_t)^2$	$q_e$ (mg/g) $K_2$ (g/mg.min)	0,456 0,023	0,964

### 3.6 TRAITEMENT D'UNE EAU RÉELLE

Les résultats des analyses de caractérisation physico-chimique de l'effluent de la STBV de la ville de Korhogo sont présentés au tableau 4. Le pH de l'eau est basique (pH = 9,2) et la concentration de  $P-PO_4^{3-}$  est de  $9,75 \pm 0,46$  mg P/l. On remarque également une présence d'anions, tels que  $NO_3^-$ . Lorsque le traitement est fait dans les conditions optimales obtenues en solution synthétique, mais sans ajustement du pH initial de l'eau (pH = 9.2), le taux d'élimination du phosphore est de l'ordre de 27,9 %. Ce taux augmente à 42,5%, lorsque le pH initial est ajusté à 5. Aussi, lorsque la concentration de boues est majorée de 10 g/L à 40 g/l, on observe une augmentation du taux d'élimination du phosphore, passant 42,5 % à 87,5% au bout de 4 h de temps de contact (figure 5).

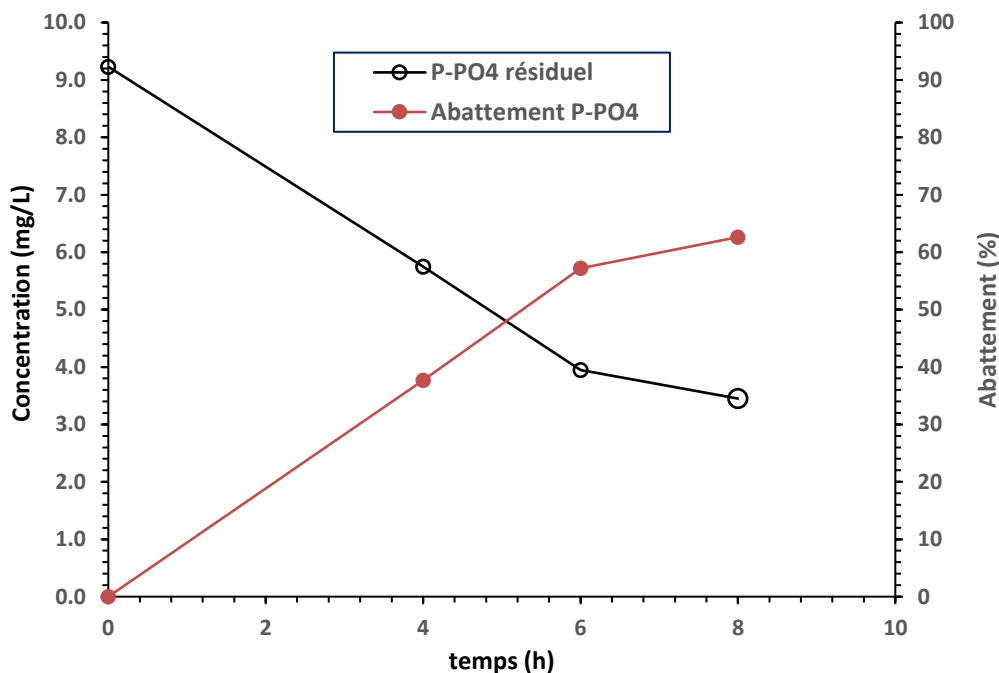


Fig. 5. Aptitude des boues à éliminer le phosphore au cours du temps (Eau réelle, [Boue] = 10G/L, vitesse d'agitation = 150 tr/min)

## 4 DISCUSSION

La concentration de Al dans les boues de l'UPEP de Sinematiali ( $307,6 \pm 0,6$  g/kg) est similaire à celles rapportées dans la littérature sur les boues d'UPEP qui utilisent l'alun ( $[Al] = 36,9 - 460$  g/kg) ([21], [22]). Lorsque ce dernier est injecté dans l'eau, il se retrouve sous les formes  $Al^{3+}$  et  $Al(OH)_3$  [23]. Ces formes contribuent à la clarification de l'eau, en réagissant avec les colloïdes et matières en suspension (MES), puis se retrouvent dans les boues à l'étape de décantation. Elles sont également très réactives au phosphore.

Aucun réactif à base de fer n'est utilisé dans l'UPEP de Sinematiali. Par conséquent, le fer détecté de manière significative dans les boues ( $208,7 \pm 1,2$  g/kg), serait apporté par l'eau brute (fleuve Bandama). En effet, les analyses de caractérisation de l'eau brute (données non présentées ici) ont montré que pendant les saisons des pluies, l'eau brute se charge en matières dissoutes et particulaires diverses (sol, limon, etc) provenant des sols environnants, riches en fer. En effet, jusqu'à 1 mg/l de fer a été analysé dans l'eau brute. Le transfert du fer dissous aux boues se produirait lors de l'étape de préchloration dans l'usine. Le fer rendu insoluble est ensuite piégé dans les boues lors de l'étape de coagulation chimique. En comparaison, la concentration de fer dans les boues de Sinematiali est largement supérieure à celles rapportées dans la littérature (0,041 – 102 g/kg) ([8], [24]). Les sols de la région sont de type de latéritique, ferrugineux, et ferralitique: riches en fer ([25], [26]).

Le calcium et le magnésium sont présents dans les boues à des concentrations similaires à celles rapportées dans la littérature, soient  $[Ca] = 0,125 - 67,8$  g/kg ([24], [27]) et  $[Mg] = 0,085 - 12,28$  g/kg ([28], [29]). Étant donné que l'UPEP de Sinematiali utilise la chaux pour la neutralisation, le calcium proviendrait en partie de cette étape. Cependant, le magnésium n'intervient pas dans le process de l'usine. Sa présence dans les boues proviendrait de l'eau brute.

Les résultats de traitabilité du phosphore montrent que les boues de l'UPEP de Sinematiali ont une aptitude relativement bonne à éliminer le phosphore. Cela est lié à la présence des éléments chimiques tels que Al, Fe et Ca. En effet, la présence de ces éléments chimiques et les propriétés de surface des granules de boues faciliteraient les interactions entre les granules de boues et le phosphore.

L'élimination du phosphore évolue selon deux phases. La première phase s'apparente à une adsorption sur les granules de boues. Elle serait gouvernée principalement par la formation de liaisons ioniques et/ou de ligands avec Fe, Al, Ca, oxydes et/ou carbonates. La



seconde phase de l'élimination du phosphore est caractérisée par un faible taux d'élimination du phosphore. Elle serait gouvernée par des réactions de précipitation, de polymérisation de surface et/ou de diffusion à l'intérieur des granules de boues [27]. Les réactions de précipitation se font avec les ions  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  et  $Ca^{2+}$  mis en solution par effritement des granules de boues. En effet, une fois en solution, les ions métalliques réagissent directement avec  $PO_4^{3-}$  ou se transforment en hydroxydes pour piéger le phosphore particulaire. Les précipités ainsi formés sont généralement petits, sous forme de colloïdes stables et difficiles à être totalement séparés de l'eau par décantation gravitaire [30].

Le pH initial de l'eau affecte les performances d'élimination du phosphore sur les boues de l'UPEP de Sinematiali. En effet, il affecterait l'état ionique des composés, des groupements fonctionnels de surface et/ou les charges [15]. Ce qui contribue à modifier les interactions entre le phosphore et la boue. Le pH optimal déterminé dans la présente étude est similaire à celui rapporté dans la littérature sur l'utilisation des boues d'alun pour le traitement du phosphore (pH optimal = 4,3 – 5) ([22], [31], [32]). L'agitation entraîne un effritement des granules de boues et une remise en eau des suspensions fines. En milieu acide (cas des pH < 5), l'effritement des granules de boues est plus accentué et les ions métalliques  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$  et  $Fe^{3+}$  se solubilisent. Ils se dissocient des boues et réagissent avec les ions  $PO_4^{3-}$  pour former des composés, tels que  $Al_2(PO_4)_3$ ,  $Fe_2(PO_4)_3$ , qui sont également solubles à pH < 5 [27]. Ceci explique la baisse de performances d'élimination du phosphore observée en milieu acide. Aussi, lorsque le pH augmente au-delà de 5, la concentration d'ions  $OH^-$  commence à augmenter en solution. Les ions  $OH^-$  entourent alors les ions métalliques ( $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$  et  $Fe^{3+}$ ) pour former un ensemble négatif [27]. Cela entraîne une répulsion, caractérisée par une baisse des performances d'élimination du phosphore.

L'augmentation de la concentration de boues entraîne une augmentation du taux d'élimination du phosphore. Cette tendance est rapportée dans la littérature ([7], [33], [34]). En effet, lorsque la concentration des boues augmente, la quantité d'éléments réactifs et le nombre de sites actifs augmentent également et contribuent à améliorer le taux d'élimination du phosphore. [22] a rapporté une amélioration du taux d'élimination du phosphore (passant de 49,2 à 96,7%), lorsque les concentrations de boues d'alun sont augmentées de 10 à 20 g/l.

L'analyse des données d'isothermes indiquent que les données expérimentales sont bien décrites par les modèles mathématiques de Freundlich et Langmuir, avec un léger avantage pour le modèle de Langmuir. Selon le modèle de Langmuir, la constante  $R_L$  tient compte du facteur de séparation des paramètres d'équilibre et permet de prédire si l'adsorption est favorable ou non ([16], [17]). Lorsque  $R_L > 1$ , l'adsorption n'est pas favorable, alors qu'elle est favorable lorsque  $R_L$  se situe entre 0 et 1 ( $0 < R_L < 1$ ). Pour des valeurs de  $R_L$  très proches de 0, l'adsorption est considérée comme irréversible. L'adsorption est linéaire lorsque  $R_L$  est égale à 1 ([16], [17], [35]). Vu la valeur obtenue de  $R_L$  dans la présente étude ( $R_L = 0,149 \pm 0,14$ ), on en déduit que l'élimination du phosphore est favorable dans les conditions expérimentales testées. Aussi, selon le modèle de Langmuir, l'élimination du phosphore sur les granules de boues d'alun est monocouche et la capacité maximale ( $q_m$ ) d'élimination du phosphore est 1,720 mg/g. Certes, la valeur de  $q_m$  est dans l'intervalle rapportée par la littérature (1,58 mg/g – 31,9 mg/g) ([12], [22], [27], [36]), elle se situe dans l'extrémité inférieure. Cette grande fluctuation des données issues de la littérature est attribuée aux facteurs, tels que la variation de la composition des boues, la pureté de l'alun utilisé, les produits chimiques utilisés, la composition de l'eau brute, etc. Selon le modèle de Freundlich, l'exposant  $n$  décrit la non-linéarité du processus d'élimination du phosphore. Lorsque  $n > 1$ , cela indique que l'adsorbant est faiblement lié à l'adsorbant, d'où une faible variation de l'énergie libre d'adsorption. L'exposant  $n < 1$  indique que la majorité d'adsorbats fixés sur l'adsorbant améliore les énergies libres pour les adsorptions à venir. La valeur de  $n$  obtenue dans la présente étude ( $n = 3,175 > 1$ ), indique que le phosphore se lie faiblement aux granules de boues d'UPEP. Des essais thermodynamiques (à réaliser sous différentes conditions de températures) pourraient permettre de déterminer les énergies impliquées et aider à définir les types d'interactions entre les granules de boues et le phosphore.

L'analyse des données cinétiques fait ressortir que le modèle cinétique de pseudo ordre 2 décrit le mieux la cinétique d'adsorption du phosphore sur les granules de boues d'UPEP ( $R^2 = 0,963$ ).

Le taux d'élimination du phosphore est plus faible dans l'eau réelle que dans l'eau synthétique. Cela est en lien avec la composition plus hétérogène de la matrice d'eau réelle (effluent de la STBV de Korhogo). Elle contient toute une panoplie d'éléments chimiques qui pourraient entrer en compétition avec les ions  $PO_4^{3-}$ . Étant donné que les sites actifs ne sont pas sélectifs, ils peuvent interagir avec tout type d'anions monovalents ou polyvalents. D'ailleurs, les résultats de caractérisation de l'eau traitée montrent que la concentration des nitrates diminue au cours du traitement (passant de 167,8 mg/l à 143,6 mg/l). L'effet de la présence des anions autres que  $PO_4^{3-}$  sur les performances des boues devrait être investigué.

## 5 CONCLUSION

La présente étude a permis de connaître la composition physico-chimique des boues de l'UPEP de Sinematiali qui utilise l'alun. Ces boues sont riches en éléments réactifs au phosphore, tels que Al ( $307,6 \pm 0,6$  g/kg) et Fe ( $208,7 \pm 1,2$  g/kg), Ca ( $9,3 \pm 0,0$  g/kg) et de Mg ( $15,0 \pm 0,1$  g/kg). Les essais ont démontré qu'une fois déshydratées et conditionnées en granules, les boues d'UPEP ont une capacité d'élimination du phosphore significative et comparable à ce que la littérature rapporte sur d'autres types de matériaux déphosphatants. L'élimination du phosphore sur les granules de boues d'UPEP évolue selon deux phases, la première phase étant la principale. Elle est

principalement gouvernée par l'adsorption. La deuxième phase est gouvernée par la précipitation et/ou polymérisation du phosphore. Le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre du traitement est de 4 h et le pH optimal est de 5. Le pH 5 permet d'atteindre un taux d'élimination de phosphore de 70% lorsqu'il s'agit d'une eau synthétique et 42,5% lorsqu'il s'agit d'une eau réelle (concentration de boues: 10 g/l). La différence de performances est en lien avec la présence d'éléments chimiques compétiteurs dans l'eau réelle, tels que les nitrates. L'adsorption du phosphore est parfaitement décrite par les isothermes de Freundlich et Langmuir, avec un léger avantage pour le modèle de Langmuir ( $q_m = 1,72 \text{ mg/g}$ ,  $R^2 = 0,985$ ). L'adsorption du phosphore sur les granules de boues d'alun est monocouche et la capacité maximale d'adsorption du phosphore est  $q_m = 1,720 \text{ mg/g}$ . Le phosphore se lie faiblement aux granules de boues d'UPEP. La cinétique du processus d'adsorption du phosphore est décrite par le modèle de pseudo-ordre 2, avec  $k_2 = 0,023 \text{ g/mg.min}$  et un coefficient de détermination  $R^2 = 0,963$ . Les paramètres cinétiques obtenus sont similaires à ceux rapportés dans la littérature pour d'autres types de matériaux déphosphatants. L'augmentation de la concentration de boues fait accroître de façon significative le taux d'adsorption du phosphore. Dans le cas du traitement d'une eau réelle (effluent de STBV), lorsque la concentration de boues est majorée de 10 g/L à 40 g/l, on observe une augmentation du taux d'élimination du phosphore, passant 42,5 % à 87,5% au bout de 4 h de temps de contact.

## REFERENCES

- [1] Coulibaly L.S., Abattement des phosphates des eaux usées par adsorption sur des géomatériaux constitués de Latérite, grès et schistes ardoisiers, Thèse de Doctorat Géosciences, Université de Lorraine, 177p, 2014.
- [2] Roy-Dumesnil G, Capture passive du phosphore d'une eau usée municipale en contexte de biofiltration. Université.
- [3] R. Galvez-Cloutier, S. Ize, and S. Arsenault, «La détérioration des plans d'eau: Manifestations et moyens de lutte contre l'eutrophisation», *Vecteur environnement* vol. 35, no. 6, pp. 18-37, 2002.
- [4] Metcalf et Eddy, *Wastewater Engineering. Treatment and reuse*, Fourth ed, McGraw-Hill Education, New York, 1819p, 2003.
- [5] M. Letshwenyo, R. Moroeng, and L. Mpenyana-Monyasti, «Investigation on the performance of a full-scale waste stabilization pond system in Botswana», *Physics and Chemistry of the Earth*, parts A/B/C, 72-75, pp.232-238, 2014.
- [6] C. Vohla, M. Kõiv, H.J. Bavor, F. Chazarenc and Ü. Mander, «Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands», *Ecological Engineering*, vol. 37, no. 1, pp. 70–89, 2011.
- [7] N. M. Agyei, C.A. Strydom and J.H. Potgieter, «The removal of phosphate ions from aqueous solution by fly ash, slag, ordinary Portland cement and related blends», *Cement and Concrete Research* vol. 32, no. 12, pp. 1889-1897, 2002.
- [8] A.O. Babatunde and Y.Q. Zhao, «Constructive approaches toward water treatment works sludge management: An International Review of Beneficial Reuses», *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 37, no. 2, pp.129-164, DOI: 10.1080/10643380600776239, 2007.
- [9] D.F. Xu, J.M. Xu, J.J. Wu and A. Muhammad, «Studies on the phosphorus sorption capacity of substrate used in constructed wetland systems», *Chemosphere*, vol. 63, no. 2, pp. 344-352, 2006.
- [10] SODECI (Société de distribution d'eau de la Côte d'Ivoire) (2018). Rapport de développement durable. 119p.
- [11] Y.Q. Zhao, A.O. Babatunde, Y.S. Hu, J.L.G. Kumar and X.H. Zhao, «Pilot field-scale demonstration of a novel alum sludge-based constructed wetland system for enhanced wastewater treatment», *Process Biochemistry*, vol. 46, pp. 278–283, 2011.
- [12] A.O. Babatunde and Y.Q. Zhao, «Equilibrium and kinetic analysis of phosphorus adsorption from aqueous solution using waste alum sludge», *Journal of Hazardous Material*, vol. 184 no.1-3, pp. 746-752, 2010.
- [13] K.B., Dassanayake, G.Y. Jayasinghe, A. Surapaneni and C. Hetherington, «A review on alum sludge reuse with special reference to agricultural applications and future challenges», *Waste Management*, vol. 38, pp. 321–335, 2015.
- [14] B. Seyhi, P. Drogui, G. Buelna and J-F Blais, «Modeling of sorption of bisphenol A in sludge obtained from a membrane bioreactor process», *Chemical Engineering Journal* 172, 61–67, 2011.
- [15] B. Seyhi, P. Drogui, P. Gortares-Moroyoqui, I. Maria, Estrada-Alvaradob and L.H. Alvarezb, «Adsorption of an organochlorine pesticide using activated carbon produced from an agro-waste material», *Journal of Chemical and Biotechnology*, vol. 89 no. 12, pp. 1811–1816, 2014.
- [16] R. Shokoohi, M.H. Saghi, H.R. Ghafariet and M. Hadi, «Biosorption of iron from aqueous solution by dried biomass of activated sludge», *Iran Journal of Environmental Health Science and Engineering*, vol.6, no. 2, pp. 107-114, 2009.
- [17] S. K. Lagergren, «About the theory of so-called adsorption of soluble substance», *Kung Sven. Vetensk. Hand*, vol. 24, pp.1-93, 1898.
- [18] A.K. Bhattacharya and C. Venkobachar., «Removal of cadmium (II) by low cost adsorption», *Journal of Environmental Engineering*, vol. 110, no. 1, pp. 110-122, 1984.
- [19] MDDELCCQ (Ministère du Développement Durable, de L'environnement et de la Lutte Contre les Changements Climatiques du Québec), Détermination des solides totaux et des solides totaux volatils: méthode gravimétrique, MA. 100 – S.T. 1.1, Rév. 5, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 13 p. 2017.
- [20] M.R. Patil et P.D. Raut, «Removal of phosphorus from sewage effluent by adsorption on Laterite», *International Journal of Engineering Research & Technology* (IJERT), vol.2, no. 9, pp. 551-559, 2013.
- [21] Djekoune L., Valorisation des boues issues du traitement des eaux de surface dans l'élimination des phosphates. Mémoire pour l'obtention du Magister, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene. N° d'ordre: 05/2014-11/GP. 103p, 2014.

- [22] A.T. Nair and M.M. Ahammed, «Water treatment sludge for phosphate removal from the effluent of UASB reactor treating municipal wastewater», *Process Safety and Environmental Protection* vol.94, no. 201, pp. 105–112, 2015.
- [23] V. Gopalakrishnan and R. Velkennedy, «A Study of the Influence of Water Treatment Plant Sludge on Wastewater Treatment», *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, vol. 39, no. 1, pp. 325-329, 2016.
- [24] A. D. Tidjani, and V. Hien, «Évaluation de la fertilité des sols de la région de la Côte d'Ivoire: cas d'Adiaké et de Korhogo», *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, vol. 22, pp.69-83, 2013.
- [25] I. N. Ouattara, E. K. Koffi, K. A. Kouamé, F. B. Appia, and K. E. Kassin, «Évaluation de la fertilité des sols dans la zone cotonnière de Korhogo, au nord de la Côte d'Ivoire», *International Journal of Biological and Chemistry Sciences*, vol. 12 no 4, 1938-1951, 2018.
- [26] N. Maqbool, Z. Khan and A. Asghar, «Reuse of alum sludge for phosphorus removal from municipal wastewater», *Desalination and Water Treatment*, vol. 57, no. 28, pp.13246-13254, 2016.
- [27] M. Kyncl., «Opportunities for water treatment sludge re-use», *GeoScience Engineering*, Vol. LIV, No.1, pp. 11-22, ISSN 1802-5420, 2008.
- [28] G.M. Anujkumar and M. Ahammed, «Water treatment sludge for removal of heavy metals from electroplating wastewater», *Environment and Engineering Research*, vol. 23, no. 1, pp.92-98, 2018.
- [29] Lemay J., Déphosphatation des eaux usées par l'utilisation de boues d'alun. Université de Sherbrooke. Faculté des sciences appliquées. Mémoire de maîtrise. ISBN 0-315-31755-8. 158p, 1985.
- [30] R. Y. Yang, S. C. S. Tsou, T. C. Lee; L-C. Chang, G. Kuo, P-Y. Lai, «Moringa, a novel plant rich in antioxidants, bioavailable iron, and nutrients», *American Chemical Society Symposium Series*, Vol. 925, no 17, pp. 224-239, 2006 [16] S. Gao, J. Cui and Z. Wei, (2009), «Study on the fluoride adsorption of various apatite materials in aqueous solution», *Journal of Fluorine Chemistry*, vol. 130, pp.1035-1041, 2009.
- [31] Y.Q. Zhao and Y. Yang, «Extending the use of dewatered alum sludge as a P-trapping material in effluent purification: study on two separate water treatment sludges», *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, vol. 45, no. 10, pp. 1234-1239, 2010.
- [32] Ouakouak A, Élimination du cuivre, des nitrates et des phosphates des eaux par adsorption sur différents matériaux. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, de Biskra, Algérie. 211p, (2017).
- [33] Kpannieu D.E., Traitement de la pollution phosphorée des effluents résiduels urbains par des matériaux de Côte d'Ivoire constitués de schiste ardoisier, grès et latérite: approches en réacteur homogène, en mode hydrodynamique contrôlé et en réacteur micro-pilote de terrain. Chimie analytique. Thèse doctorale. Université de Lorraine; Université Nangui Abrogoua (Abidjan), Français. 178p, 2018.
- [34] I. Langmuir, «The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum», *Journal of the American Chemical Society*, vol. 40, pp. 1361-1403, 1918.
- [35] Talib A.T., Characteristics and mechanisms of phosphorus removal by dewatered water treatment sludges and the recovery, Doctoral thesis, Cardiff School of Engineering, Cardiff University, 166p, 2017.