



## **Caractérisation des sédiments du système lacustre de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire) et spéciation de leurs phosphores (Characterization of sediments of Yamoussoukro lake system (Côte d'Ivoire) and their phosphorus speciation)**

**Kouakou K. A.<sup>1,2</sup>, Aw S.<sup>1,\*</sup>, Adamou M. M.<sup>3</sup>, Siaka S.<sup>1</sup>, Savane I.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> - *Laboratoire des Procédés Industriels de Synthèse, de l'Environnement et des Énergies Nouvelles, Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny, BP 1313 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire*

<sup>2</sup> - *Laboratoire des Sciences de l'Environnement (LES), UFR-Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Nangui-Abrogoua, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire*

<sup>3</sup> - *Département Génie rural, Eaux et Forêts, Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, BP 10 960 Niamey, Niger*

Received 03 October 2013, Revised 4 Apr 2014, Accepted 4 Apr 2014

\* Corresponding author: [aw.sadat@yahoo.fr](mailto:aw.sadat@yahoo.fr)

### **Abstract**

Phosphorus, a dominant element of inland waters eutrophication was studied on the lake water matrix system of Yamoussoukro. In order to assess the potential mobility of this element in sediments, our work was achieved to characterize the lake sediments of this system, and then to evaluate the forms of their constitutive phosphorus. To reach this purpose, sequential extraction by the method of Paludan & Jensen was used due to its easiness implementation. The pH of extraction solutions was adjusted to that of the sediment in order to minimize disruption of the matrix including the hydrolysis of organic moieties. This work showed that sediment textures were composed of clay and silt, with high levels of iron (average: 1909.85 µg/g). Total phosphorus contents in sediments varied from one lake to another, with values ranging from 765.6 µg per g to 1202.8 µg per g. Speciation reveals that phosphorus sediments studied is present in inorganic form (81% to 91%). The fraction bound to the organic material ranges from 14-24% of total phosphorus and based on lakes.

*Keywords:* Sediment; Speciation Phosphorus; tropical lake, Yamoussoukro.

### **Resumé**

L'étude du phosphore, élément prépondérant caractérisant l'eutrophisation des eaux continentales, a été réalisée sur la matrice eau du système lacustre de Yamoussoukro. Afin d'évaluer les potentialités de mobilité de cet élément dans les sédiments dudit système, la présente étude a été entreprise dans le but de caractériser les sédiments des lacs de ce système lacustre et d'évaluer les formes de phosphore qu'ils contiennent. L'extraction séquentielle du phosphore par la méthode de Paludan & Jensen (1995) a été retenue pour sa simplicité de mise en œuvre. Le pH des solutions d'extractions a été ajusté à celui du sédiment afin de minimiser les perturbations de la matrice notamment l'hydrolyse des fractions organiques. Les résultats de cette étude montrent que les sédiments ont des textures de type argilo-limoneuses ou sableuses avec de fortes teneurs en fer (valeur moyenne : 1909,85 µg/g). Les teneurs en phosphore total des sédiments varient d'un lac à l'autre avec des valeurs qui sont comprise entre de 765,6 µg/g à 1202,8 µg/g. La spéciation du phosphore des sédiments montre que le phosphore présent dans les sédiments est globalement sous la forme inorganique (de 81 % à 91 %). La fraction liée à l'aluminium représente plus de 23 % du phosphore inorganique tandis que la fraction liée à la matière organique varie entre 14 à 24 % du phosphore total et en fonction des lacs.

*Mots clés :* Sédiment ; Spéciation ; Phosphore ; Lac tropical ; Yamoussoukro.

### **1. Introduction**

Ces dernières années, une attention croissante de la communauté scientifique s'est portée sur la préservation des écosystèmes aquatiques. La dégradation continue et accélérée de ceux-ci avec pour corollaire les phénomènes d'eutrophisation, est une réalité à laquelle peu d'endroits au monde échappent. Les modifications majeures observées, dues tant aux activités anthropiques (industrialisation et urbanisation rapides) qu'aux facteurs naturels, ont des conséquences écologiques potentielles [1].

Les effluents urbains représentent une source majeure de contaminants chimiques dans l'environnement aquatiques [1-4]. La plupart des études ont montré que les nutriments, les métaux et les substances organiques

sont largement présents dans les effluents municipaux [5, 6]. Le phosphore est considéré comme un nutriment clé, responsable de l'eutrophisation des eaux continentales et de certains milieux côtiers [7-10]. Les apports en phosphore sont assurés soit par des apports exogènes (rejets agricoles et urbains) soit par le lac lui-même à partir des réserves en phosphore situées au niveau du sédiment [11]. Cette charge interne constitue souvent une source importante de phosphore pour les eaux sus-jacentes [12-14]. La mobilisation du phosphore comporte plusieurs processus tels que la désorption, la dissolution du phosphore inclus dans les précipités, les échanges de ligands, le processus de minéralisation achevé par une hydrolyse des liaisons ester-phosphates, le relargage du phosphore à partir des cellules vivantes et enfin l'autolyse des cellules [15] ; [16] ; [14].

Très peu d'études concernant le rôle des sédiments des environnements aquatiques en Afrique subtropical ont été reportées dans la littérature. La plupart de celles qui ont été menées porte sur la colonne d'eau [17] ; [18] ; [2]. Dans ces environnements, la phase solide (particules en suspension et les sédiments) jouent un rôle déterminant dans l'équilibre des écosystèmes. En effet, les sédiments influencent les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des eaux. L'objectif de ce travail est de caractériser et déterminer la répartition du phosphore dans les sédiments du système lacustre de Yamoussoukro.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Zone d'étude

La ville de Yamoussoukro est située dans le centre de la Côte d'Ivoire à 250 km au nord-ouest d'Abidjan et à environ 6°5' de latitude Nord. Elle possède un climat de type tropical humide de transition et est dotée d'un ensemble de lacs artificiels peu profonds aménagés sur deux cours d'eaux, qui communiquent entre eux selon le schéma suivant (figure 1).

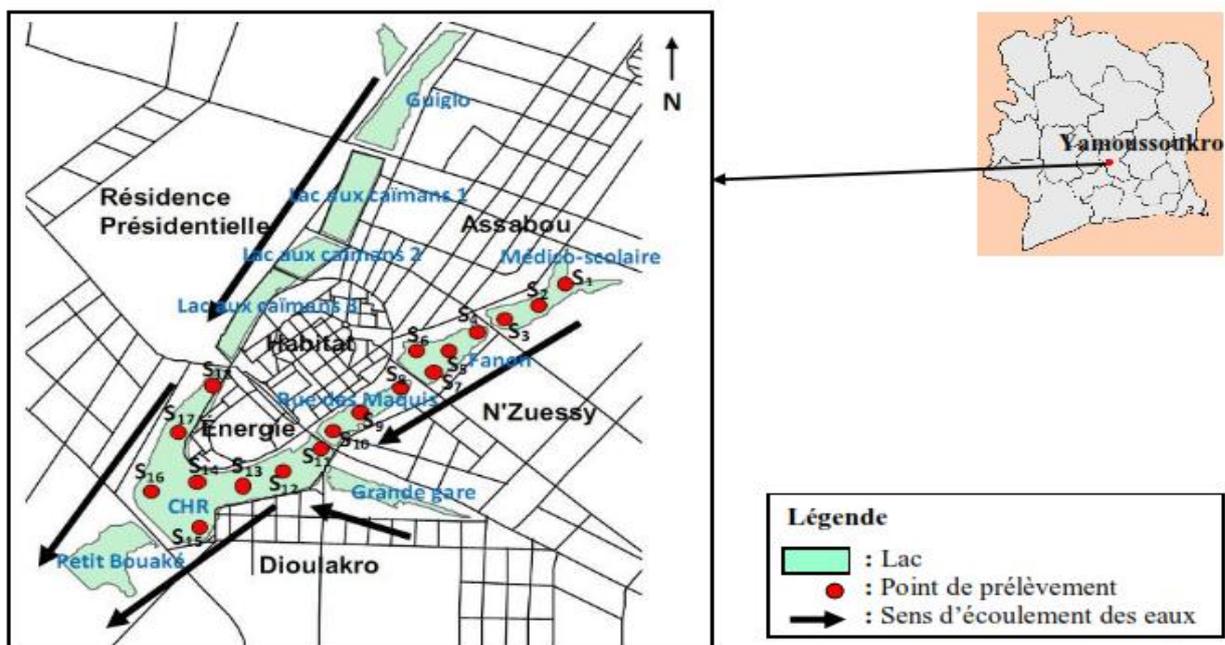


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude et des points de prélèvements

Ce système lacustre présente un intérêt particulier pour mener des études comparatives. En effet, ces lacs alimentés par une même eau, se contaminent en cascade et sont le siège d'apports exogènes variables suivant leurs situations géographiques. La présente étude a porté sur quatre (4) lacs dudit système. Le substratum rocheux du terrain expérimental est constitué principalement par des granitoïdes alcalins. Ce socle est recouvert par des altérites, riches en oxydes de fer et d'aluminium [19]. Ce système lacustre a fait l'objet de plusieurs études qui ont toutes été menées sur la colonne d'eau [17] ; [18] ; [2].

Les environnements immédiats des lacs étudiés sont décrits dans le tableau 1.

### 2-2 Echantillonnage

Le matériel naturel de travail est constitué de sédiments superficiels sur une épaisseur de 15 cm. Plusieurs sites ont été retenus en fonction de leur capacité à satisfaire au mieux les objectifs définis pour cet travail.

L'étude a portée sur quatre (04) lacs du système lacustre de Yamoussoukro (fig. 1). Une carotte (longueur: 15 cm; diamètre: 5 cm) a été récoltée en chaque point d'échantillonnage pour les analyses physico-chimiques. Les sédiments proviennent de dix-huit (18) stations de prélèvement réparties d'amont en aval couvrant l'ensemble des lacs de l'étude. Pour une bonne estimation du niveau de pollution de notre site d'étude, trois (3) campagnes de prélèvement ont été effectuées (grande saison sèche, petite saison pluvieuse et grande saison pluvieuse). Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'un carottier en acier inoxydable, triés (élimination de brindilles, végétaux, plastiques, ...), emballés puis transportés au laboratoire dans une glacière. Au laboratoire ils ont été séchés dans une salle à température ambiante (28–30°C) à ventilation naturelle pendant 5 jours. Les échantillons secs ont été emballés dans des sachets en polyéthylène et conservés au réfrigérateur pour les analyses.

**Tableau 1** : Description des stations de prélèvement

Lac	Code de station	Description et activités anthropiques
Médico-Scolaire (MS)	S1MS	
	S2MS	Culture maraichères utilisant des engrais (chimique ou fiente d'élevage). Lac envahit par des végétaux aquatiques, soumis aux apports anthropiques d'une zone densément peuplée et recevant les eaux usées du plus grand centre médico-scolaire de la ville.
	S3MS	
S4MS		
Fanon (F)	S1F	Situé en zone moyennement habitée, bordé par des complexes hôteliers.
	S2F	
	S3F	
	S4F	
Rue des Maquis (RM)	S1RM	Concentration sur les bordures d'activités touristiques (restaurants, gares, hôtels) dont il reçoit les eaux usées. Envahissement partielle par des végétaux aquatique.
	S2RM	
	S3RM	
Centre Hospitalier Régional (CHR)	S1CHR	Plus grand lac du système lacustre, recevant les eaux provenant des deux branches. Couvert de végétaux aquatiques à plusieurs endroits. Présence des laveurs de linge et de véhicules utilisant des lessives. Reçoit les eaux usées du centre hospitalier régional.
	S2CHR	
	S3CHR	
	S4CHR	
	S5CHR	
	S6CHR	
	S7CHR	
	S8CHR	

### Caractérisation des sédiments

La caractérisation des sédiments a consisté à déterminer le pH, la granulométrie, la teneur en métaux et en carbone organique. Les méthodes et les noms de détermination de ces paramètres sont résumés dans le tableau 2.

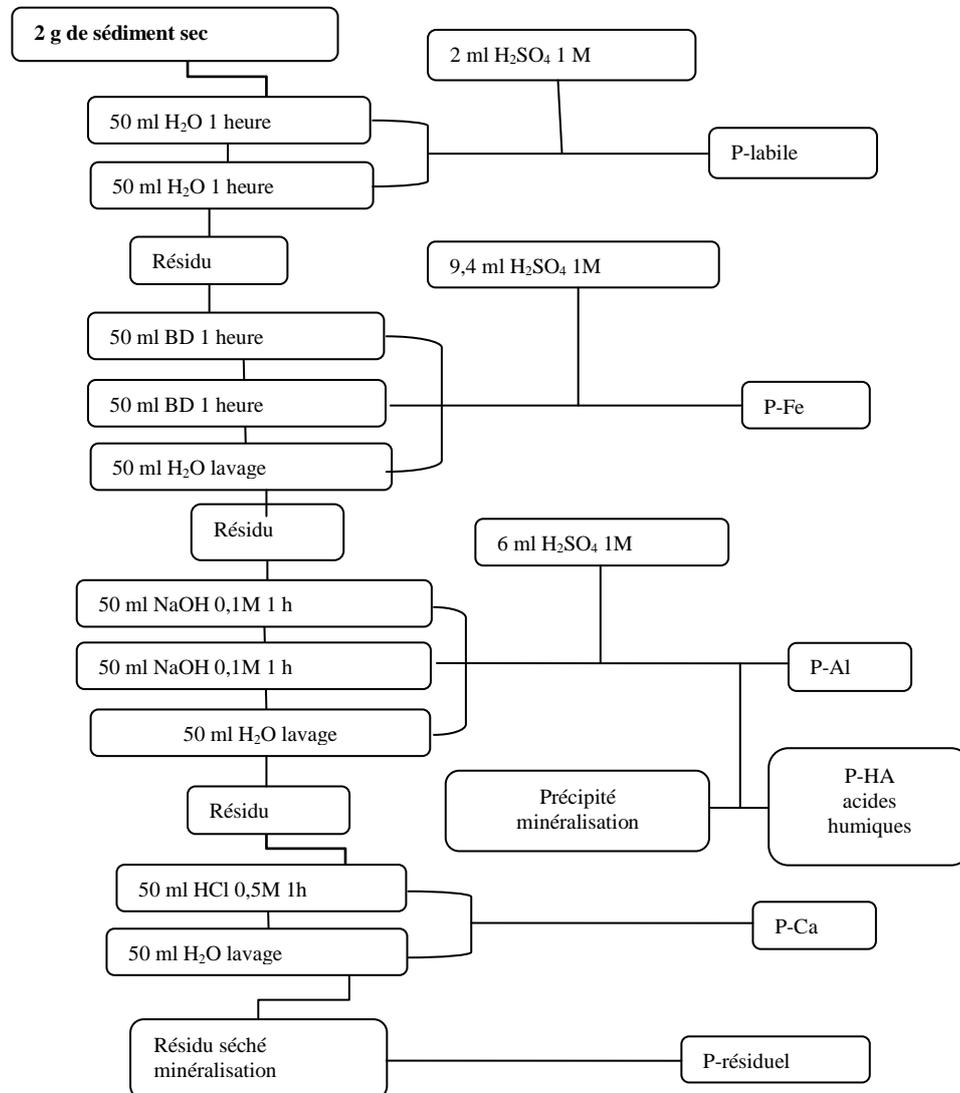
**Tableau 2** : Protocoles analytiques

Type d'essai	Méthodes utilisées
Détermination du pH	NF EN 12176, mai 1998
Détermination de la granulométrie	NEN5357 et ISO/DIS 11277
Détermination du carbone organique total	NF ISO 14235 de septembre 1998
Dosage de Fe, Zn, P, Ca, Na, Mg, K par spectrométrie d'émission atomique	NF ISO 11885, novembre 1997

### 2-3 Extraction et spéciation du phosphore des sédiments

Pour l'extraction et la spéciation du phosphore des sédiments, la fraction inférieure à 2 mm a été utilisée après broyage doux au mortier. Le phosphore total a été dosé, après minéralisation du sédiment ( $H_2SO_4/K_2SO_4$  saturé à

400 °C), selon la méthode du bleu de molybdène Murphy et Riley (1962). Les orthophosphates ont été dosé par la même méthode sur le filtrat (filtre Wattman GF/C) de suspensions de sédiments dans de l'eau distillée. La spéciation du phosphore a été réalisée selon la méthode de Paludan et Jensen (1995) dont le principe est schématisé dans la figure 2.



**Figure 2 :** Protocole de spéciation du phosphore sédimentaire [20].

Le logiciel STATISTICA 7 a été utilisé pour l'analyse statistique des données de cette étude.

### 3- Résultats et discussion

#### 3.1. Caractérisation des sédiments

Le tableau 2 ci-après présente les résultats de l'étude des propriétés (granulométrie, la matière organique, teneurs en oligo-éléments et pH) permettant de caractériser les sédiments du système lacustre de Yamoussoukro. Sur la base de l'étude granulométrique les sédiments des lacs du système lacustre de Yamoussoukro se composent de sable grossier et fin, de limon et d'argile. Ils présentent des pH relativement acides (variant entre 4,97 et 6,40) et une teneur en matière organique (variant entre 7,42 et 33,43).

De ce tableau il ressort que les sédiments des lacs « Médico-scolaire » et « Rue des maquis » présentent respectivement 46,34 % et 31,65 % d'argile et 27,04 % et 30,04 % de limon dont ils sont majoritairement constitués. Les lacs « Fanon » et « CHR » quant à eux présentent respectivement 59,17 % et 68,08 % de sable fin et grossier. Ces types de sédiments ont été déjà observés en zone tropical par des auteurs qui ont montrés que les

dimensions des particules des sédiments du ruisseau Okpoka dans le Delta du Niger sont constituées de sable, d'argile et de limon [21].

**Tableau 2 :** Caractérisation des sédiments des différents lacs étudiés (moyennes des valeurs par lac)

Propriétés	Sédiments					
	MS	Fanon	RM	CHR		
Dimension des grains (%)	<4µm	Argile	53,71±7,47	22,57±19,77	33,88±6,74	14,15±5,23
	4-63µm	Limon fin	21,72±1,30	16,91±16,55	26,59±15,89	9,12±2,87
		Limon grossier	6,52±2,51	6,80±2,44	7,51±4,25	6,66±1,91
	>63µm	Sable fin	8,91±0,82	13,00±7,76	17,11±7,33	35,38±16,15
		Sable grossier	7,99±3,55	40,07±27,49	13,98±12,35	33,78±21,51
Métaux (µg/g)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2741,00±143,15	1593,67±52,18	1710,75±41,16	1592,44±348,18	
	CaO	37,32±27,15	9,35±0,30	7,20±3,79	10,41±5,60	
Matière organique (%)		41,80±27,60	8,45±1,61	5,71±2,14	18,60	21,33
pH		6,41±0,56	5,70±0,28	4,96±0,39	5,44±1,17	

L'étude de la teneur en matière organique de ces sédiments révèle que le lac « CHR » est le plus riche avec (33,43%), suivi du lac « MS » (17,89 %) ; les deux derniers ayant des teneurs voisines (7,43 % et 7,42 %). Les teneurs présentées dans le tableau 2 montrent que les sédiments étudiés sont chargés en matières organiques. Ces résultats pourraient s'expliquer par l'influence des eaux usées chargées en matières organiques [22]. Aussi, les variations observées au niveau des sédiments de ces différents lacs pourraient être dues à la décomposition des végétaux aquatiques par les bactéries et aux eaux usées et de ruissellement que reçoivent les lacs [1, 2, 23]. Le fort taux de matière organique relevé au niveau du lac « CHR » peut s'expliquer par le fait que celui-ci se présente comme le réceptacle des effluents des autres lacs.

Les valeurs du pH observés montrent que les sédiments lacustres sont tous acides avec des pH variant de 4,97 (lac F) à 6,40 (lac « CHR »). Cela indique que les pH des sédiments des sites étudiés sont acides contrairement à celles des eaux qui selon AW (2009) tourneraient autour de 7. Le pH joue un rôle important dans le mécanisme de rétention ou de libération des phosphates [24].

Les teneurs en oxydes de fer observées varient de 1137,69 µg/g (lac « RM ») à 3290,44 µg/g (lac « MS »). Quant aux oxydes de calcium, ils présentent des teneurs plus faibles (de 5,48 µg/g à 8,27 µg/g). Les métaux analysés dans les sédiments de ces lacs montrent une prédominance du fer dont les teneurs moyennes peuvent atteindre 2099 µg/g. le fort taux en fer est probablement dû au contexte géologique régional de la zone d'étude composé principalement d'oxyde de fer et d'aluminium [19].

**Tableau 3:** Concentrations moyennes et écart-type de chaque fraction en phosphore.

Lac	Médico-scolaire	Fanon	Rue des maquis	CHR
<b>P-Labile</b>	113,2±46,5	85,7±34,8	138,5±52,7	156,7±62,6
<b>P-Al</b>	301,2±73,1	214,2±75,8	119,1±28,1	310,6±67,3
<b>P-Fe</b>	70,4±17,8	131,9±19	124,1±25,6	124,16±17,5
<b>P-Ca</b>	39,3±17,6	39,3±9,0	18,2±6,1	42,9±17,4
<b>P-résiduel</b>	490,1±84,6	446,8±95,6	320,2±81,7	515,9±133,5
<b>P-HA</b>	54,7±5,06	50,6±16,5	45,5±6,7	52,5±11,7
<b>P-tot.</b>	1068,8±144,9	968,5±152,5	765,6±127,3	1202,8±151,9

### 3.2. Spéciation du phosphore dans les sédiments

Les teneurs en phosphore total des sédiments prélevés dans les lacs « Médico-scolaire » et « CHR » présentent les plus grands taux de phosphore (1202,8 et 1068,8 µg/g respectivement), le lac « Fanon » lui affiche une valeur de

765,6 µg/g quand la teneur du lac « Rue des maquis » est de 968,5 µg/g. Cependant, la spéciation du phosphore montre une différence entre les fractions selon qu'on se situe dans un lac ou dans un autre (tableau 3). Les fortes concentrations de P-total pourraient s'expliquer le faible débit d'écoulement des eaux des lacs permettant aux particules de sédimenter. En effet, une étude comparative entre les eaux courantes et les eaux stagnantes a montré que les sédiments des eaux courantes avaient des teneurs en phosphore total inférieures à celles des eaux stagnantes [25]. Cette différence s'expliquerait par deux phénomènes conjugués. D'une part intervient l'effet granulométrique, étant donné que les particules qui sédimenter dans les eaux stagnantes (débit quasiment nul) sont plus fines que celles des cours d'eaux (débit plus élevé) et donc a priori plus riches en phosphore. D'autre part, une sédimentation autochtone apparaît aussi dans les eaux stagnantes due à la biomasse planctonique formée in situ, celle-ci apportant un matériel riche en matière organique et en phosphore. Il faut savoir aussi que dans les milieux aquatique, le phosphore est le facteur limitant dans le développement des végétaux aquatiques [26] ; [27]. Le phosphore des sédiments étudiés, comprend six (6) composantes : dont la fraction dominante est le phosphore résiduel avec respectivement 45,9% ; 46,1%, 41,8% ; 42,9% ; pour les lacs Médico-scolaire, Fanon, Rue des maquis et CHR (tableau 3). La fraction P-labile ou fraction minérale, dissoute dans l'eau interstitielle, est sous forme  $PO_4^{3-}$ , directement assimilable par les algues [28]. Elle représente la fraction composée et associée aux organismes (matière organique) [29].

Les fractions liées aux oxydes de fer et d'aluminium mis ensemble présentent respectivement pour les lacs MS, Fanon, RM et CHR 10,3%, 17,7%, 18,6% et 13,3%. L'accumulation du phosphore inorganique dans les sédiments est contrôlée par l'adsorption des phosphates sur les oxydes d'aluminium, de Calcium, de fer et aux hydroxydes ou argiles minérales [30]. Cette hypothèse confirme le taux élevé de la fraction d'Al-P suivi de la fraction de Fe-P. L'accumulation du calcium dans les hydroxydes et les argiles est justifiée par sa forte corrélation avec toutes les fractions granulométriques des sédiments étudiés (tableau 4). Les fractions Al-P et Fe-P sont très sensibles aux variations du pH et du potentiel redox [31] ; [32] ; [33] ; elles sont considérées comme les fractions les plus disponibles. Ces résultats sont justifiés par les caractéristiques géologiques de notre zone d'étude [19]. La fraction Ca-P (inorganique) fait l'objet de discussion quant à sa mobilisation et donc sa disponibilité pour les algues. Elle a été longtemps considérée comme peu mobilisable. Dans les sédiments, le carbonate de calcium adsorbe l'excès de phosphate qui ne peut être lié au fer et à l'aluminium. Les travaux de Kim [34] montrent que cette fraction est mobilisable tout comme les fractions liées au fer et à l'aluminium quand le pH du sédiment diminue. En effet, la mise en place des liaisons P-Fe, P-Ca, et P-Al dépend du pH. Cette assertion se confirme avec les corrélations très significatives observées entre le pH et ces différentes formes de phosphates [24]. Ainsi, une augmentation du pH diminue la capacité de fixation des ions  $Fe^{3+}$  et  $Al^{3+}$  aux sédiments à cause de la compétition entre les ions  $OH^-$  et  $PO_4^{3-}$  sur les complexes [35].

Le pourcentage de phosphore organique (P-HA et P-résiduel), extrait par une minéralisation à l'acide, est de l'ordre de 47 à 51 % pour tous les lacs étudiés. De Groot et Golterman [36] ont montré que cette fraction est principalement formée de phytates. Elle est reconnue comme très difficilement mobilisable par les sédiments tant son extraction nécessite un traitement très énergique; et est donc considérée comme non disponible pour les algues. Mesnage [37] et Golterman *et al.* [38] montrent que cette fraction peut être minéralisée quand l'activité bactérienne est intense.

**Tableau 4 :** Matrice de corrélation entre les fractions de phosphore, la granulométrie, le pH, la matière organique (M.O.) et les oligoéléments.

	Argile	Limon	Sable	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (µg/g)	CaO (µg/g)	% de M.O.	pH
<b>P-Labile</b>	-0,16	-0,11	0,16	-0,13	<b>0,28*</b>	0,20	-0,05
<b>P-Al</b>	-0,02	-0,20	0,02	<b>0,39**</b>	<b>0,28*</b>	<b>0,42**</b>	<b>0,33**</b>
<b>P-Fe</b>	<b>-0,63**</b>	<b>-0,40**</b>	<b>0,61**</b>	-0,12	0,00	0,02	<b>0,44**</b>
<b>P-Ca</b>	<b>-0,27*</b>	<b>-0,27*</b>	<b>0,36**</b>	<b>-0,28*</b>	<b>0,43**</b>	-0,08	<b>0,30*</b>
<b>P-résiduel</b>	-0,19	-0,21	<b>0,29*</b>	-0,07	<b>0,31*</b>	0,01	<b>0,53**</b>
<b>P-HA</b>	0,06	-0,15	0,01	0,23	0,19	<b>0,42**</b>	0,19

\* La corrélation est significative au niveau  $p < 0,05$ .

\*\* La corrélation est significative au niveau  $p < 0,01$ .

Le tableau 4 ci-dessus montre des corrélations intéressantes entre les différentes fractions du phosphore et certaines composantes des sédiments. Ainsi nous observons des corrélations négatives significatives entre les fractions liées au calcium (- 0,27) et au fer (- 0,63) et les fractions argileuses et limoneuses des sédiments. Des corrélations de 0,29 à 0,61 sont observées entre la partie sableuse des sédiments et les fractions de phosphate liée au fer, au calcium et au

phosphate résiduel. Une corrélation significative de 0,43 est constatée entre le calcium présent dans les sédiments et la fraction de phosphate lié au calcium. Les fractions de phosphate labile et liée aux acides humiques sont corrélées à 0,42. Le phosphate résiduel et les phosphates liées au fer et au calcium sont toutes corrélés avec le pH.

D'une manière générale et dans toute évaluation des risques d'eutrophisation d'un plan d'eau, il conviendra de déterminer les différentes fractions du phosphore afin d'évaluer le pourcentage des phosphates mobilisables et donc assimilables par les algues. Différents auteurs [39] ; [40], travaillant avec des cultures d'algues ayant comme seule source de phosphate celle de sédiments, ont montré qu'une partie des phosphates piégés dans les sédiments était disponible pour la croissance des algues. On s'accorde actuellement à considérer les phosphates solubles, la fraction Fe-P, la fraction Al-P et la fraction Ca-P comme fractions mobilisables. Les fractions P-HA et P-résiduel peuvent aussi servir de source de phosphate après minéralisation [36]. La comparaison de la somme des phosphates mobilisables par rapport à ceux non mobilisables (Tableau 3), montre que plus de 52 % du P-total des sédiments est mobilisable et donc disponible pour la croissance des algues et des végétaux aquatiques. Un résultat similaire a été observé dans le cas du réservoir de Bort-les-Orgues [41], où 80 % du P-total étaient mobilisables (Ruban *et al.* 1999 ; cité par [42]).

Le rôle du phosphore particulaire (matières en suspension et sédiments) est très important dans le contrôle du niveau trophique des réservoirs, car ceux-ci reçoivent souvent une charge solide allochtone supérieure à celle des lacs naturels. C'est le cas du lac CHR qui reçoit toutes les charges des autres lacs du système.

## Conclusion

La seule connaissance du stock total de phosphate dans les sédiments est insuffisante pour évaluer les quantités de phosphates potentiellement relargables. La mesure des différentes fractions de phosphate, par extraction sélective, permet d'approcher les phosphates mobilisables et donc assimilables par les algues. La spéciation du phosphore des sédiments du système lacustre de Yamoussoukro a mis en évidence une différence dans la composition chimique de ces sédiments. En effet, le phosphore des lacs étudiés est reparti en fractions organiques et inorganiques approximativement proportionnels. Cette étude a révélé également que le pH du milieu a une influence très importante sur le relargage du phosphate dans la matrice eau. En effet une grande partie du phosphore des sédiments étudiés se présente sous forme inorganique donc difficilement accessible par les végétaux aquatiques. De même on constat que le phosphore se fixe préférentiellement sur les oxydes d'aluminium car bien que les sédiments aient de fortes concentrations en oxyde de fer, les résultats de la spéciation du phosphore montrent un taux plus important de P-Al que de P-Fe. Le phosphore particulaire (P-labile) en suspension dans la colonne d'eau devra aussi être pris en compte. En effet, la remise en suspension du matériel sédimentaire induit des échanges entre les particules mise en suspension et le nouveau milieu avec lequel ils sont en contact. Selon les conditions du milieu, une libération ou une fixation de phosphates sur les particules peuvent avoir lieu. Des mesures de phosphates échangeables entre la phase particulaire du sédiment et de l'eau interstitielle donneraient des informations supplémentaires sur les échanges de phosphates entre les sédiments et la colonne d'eau des lacs étudiés.

## References

1. Aw S., Etudes physico-chimiques et microbiologiques d'un système lacustre tropical: cas des lacs de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire). Thèse, Chimie et Microbiologie de l'Eau, Université de Poitiers, France (2009) 234p.
2. Lhote, A., Critères d'évaluation de la qualité de l'eau d'un système lacustre tropical. Approche statistique. Université de Poitiers, Poitiers, France (2000) 154p.
3. Mokaya, S.K., J.M. Mathooko and M. Leichtfried, *African Journal of Ecology*, 42 (2004) 281-288.
4. Piyankarage, S.C., A.P. Mallawatantri, Y. Matsuno and K.A.S. Pathiratne, *Wetlands Ecology and management*, 12 (2004) 473-482.
5. Gobeil, C., B. Rondeau and B. L., *Environ. Sci. Technol.*, 39 (2005) 456-464.
6. Ministère de l'environnement du Québec et environnement du Canada, Toxic potential assesment of municipal wastewater treatment plant effluents in Quebec, (2001) 136p.
7. Banas, D., G. Masson, L. Leglize, P. Usseglio-Polatera and C.E. Boyd, *Environmental Pollution*, 152(3) (2008) 679.
8. Khan, F.A. and A.A. Ansari, Eutrophication: An ecological vision, *Botanical Review*, 71 (2005) 449-482.
9. King, K.W., J.C. Balogh and R.D. Harmel, *Environmental Pollution*, 150(3) (2007) 321-328.
10. Moore, M.T., R. Kröger, M.A. Locke, R.F. Cullum, R.W. Steinriede Jr, S. Testa Iii, R.E. Lizotte Jr, C.T. Bryant and C.M. Cooper, *Environmental Pollution*, 158(1) (2010) 175-184.
11. Schauser, I. and I. Chorus, *Water Research*, 43(6) (2009) 1788-1800.
12. Owens, P.N. and D.E. Walling, *Water Research*, 36(3) (2002) 685-701.
13. Ribeiro, D.C., G. Martins, R. Nogueira, J.V. Cruz and A.G. Brito, *Chemosphere*, 70(7) (2008) 1256-1263.
14. Zhou, A., H. Tang and D. Wang, *Water Research*, 39(7) (2005) 1245-1254.
15. Dougherty, W.J., N.K. Fleming, J.W. Cox and D.J. Chittleborough, *Journal of environmental quality*, 33 (2004) 1973-1988.

16. Wauer, G., T. Gonsiorczyk, P. Casper and R. Koschel, *Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters*, 35(1-2) (2005) 102-108.
17. Aw, S., K.A. Kouakou, M. Adamou and S. Siaka, *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 5(2) (2013) 94-97.
18. Aw, S., E.B.Z. N'goran, S. Siaka and B. Parinet, *Journal of Applied Biosciences*, 38 (2011) 2573-2585.
19. Leblond, P., Contribution aux études hydrogéologiques en Côte d'Ivoire. Université de Bordeaux 1, (1984).
20. Paludan, C. and H.S. Jensen, *Wetlands Ecology and management*, 15 (1995) 365-373.
21. George, A.D.I., J.F.N. Abowei and M.E. Allison, *Asian J. Agric. Sci.*, 2(1) (2010) 9-14.
22. Darilek, J.L., B. Huang, Z. Wang, Y. Qi, Y. Zhao, W. Sun, Z. Gu and X. Shi, *Ecosystems & Environment*, 129(1-3) (2009) 286-292.
23. Abowei, J.F.N. and F.D. Sikoki, *Water Pollution Management and Control*, Double Trust Publications Company, Port Harcourt(2005) 236p.
24. Xiangcan, J., W. Shengrui, P. Yan and C.W. Feng, *Environmental Pollution*, 139 (2006) 288.
25. Kuefel, L., *Hydrobiologia*, 251 (1993) 269-274.
26. Ahlgren J., L. Tranvik, A. Gogool, M. Waldebačck, K. Markides, E. Rydin, *Environmental Science and Technology*, 39 (2005) 867
27. Kaiserli, A., D. Voutsas and C. Samara, *Chemosphere*, 46(8) (2002) 1147-1155.
28. Salvia, M., A. Dohet, P. Vander Borghet and L. Hoffmann, *Hydrobiologia*, 459 (2001) 61 -71.
29. Carman, R., G. Edlund and C. Damberg, *Chemical Geology*, 163 (2000) 101-114.
30. Hieltjes, A.H.M. and L. Lijklema, *Journal of Environmental Quality*, 9 (1980) 405-407.
31. Böstrom, B., M. Jansson and C. Forsberg, *Arch. Hydrobiol. Beich. Erg-ben.*, 18 (1982) 5-59.
32. Jin, X., S. Wang, Y. Pang and F. Chang Wu, *Environmental Pollution*, 139(2) (2006) 288-295.
33. Ryding, S.O. and W. Rast, *Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et réservoirs*, ed. Masson(1994) 294p.
34. Kim L.H., E. Choi and M.K. Stenstrom, *Chemosphere*, 50 (2003) 53-61.
35. Versace V.L., D. Ierodionou, F. Stagnitti and A.J. Hamilton, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 123(4) (2008) 328-336.
36. De Groot C.J. and H. Golterman, *Hydrobiologia*, 252(1) (1993) 117-126.
37. Mesnage V. and B. Picot, *Hydrobiologia*, 297 (1995) 29-41.
38. Golterman H.L. and A. Booman, *Verh. Int. Ver. Limnol.*, 23 (1988) 904-909.
39. Hanna M., *Etude comparée de diverses méthodes d'évaluation de la biodisponibilité du phosphore dans l'eau*. Doctorat Université Paul Sabatier, Toulouse (1985).
40. Klapwijk S.P., J.M.W. Kroon and M.L. Meijer, *Hydrobiologia*, 92 (1982) 491-500.
41. Borghini F., J.O. Grimalt, J.C. Sanchez-Hernandez, R. Barra, C.J.T. García and S. Focardi, *Environmental Pollution*, 136(2) (2005) 253-266.
42. Taoufik M. and J.E. Dafir, *Rev. Sci. Eau*, 15(1) (2002) 235-249.

(2014) ; <http://www.jmaterenvirosci.com>