

---

## Revue des sciences de l'eau

# Distribution spatiale et mobilité du phosphore sédimentaire dans une retenue hydroélectrique

Anne Rapin, Marion Rabiet, Malgorzata Grybos, Brice Mourier, Alexis Fay, Tim Kestens et Véronique Deluchat

---

Volume 30, numéro 1, 2017

URI : [id.erudit.org/iderudit/1040066ar](http://id.erudit.org/iderudit/1040066ar)

DOI : [10.7202/1040066ar](https://doi.org/10.7202/1040066ar)

[Aller au sommaire du numéro](#)

---

### Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN 0992-7158 (imprimé)  
1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

---

### Citer cet article

Rapin, A., Rabiet, M., Grybos, M., Mourier, B., Fay, A., Kestens, T. & Deluchat, V. (2017). Distribution spatiale et mobilité du phosphore sédimentaire dans une retenue hydroélectrique. *Revue des sciences de l'eau*, 30(1), 71–76. doi:10.7202/1040066ar

### Résumé de l'article

Malgré la réduction des rejets de phosphore (P) dans l'environnement, les efflorescences phytoplanctoniques sont toujours observées dans un grand nombre de masses d'eau. C'est notamment le cas dans les retenues de barrage où la perturbation de la continuité sédimentaire peut conduire à une accumulation importante de phosphore au sein du compartiment sédimentaire. Ainsi, pour lutter contre l'eutrophisation, une meilleure connaissance de la distribution, de la réactivité et de la mobilité du P sédimentaire s'avère indispensable. Dans ce contexte, les sédiments de surface de la retenue de Champsanglard (Creuse, France) ont été prélevés en différents points selon un gradient amont/aval. Une caractérisation physico-chimique (granulométrie; teneurs en P, Fe, Al, matière organique; fractionnement chimique du P suivant le protocole de RYDIN et WELCH [1998]) a été effectuée afin d'évaluer le potentiel de relargage de P de ces sédiments. Les résultats montrent une évolution de la concentration et de la distribution du P dans les sédiments de surface dans la retenue de l'amont vers l'aval (de 1,5 à 2,3 mg P·gsec<sup>-1</sup>), qui semble corrélée avec l'évolution de la granulométrie. L'analyse du fractionnement chimique a montré que le P était majoritairement lié aux oxyhydroxydes de Fe et Mn amorphes (66 %), ces concentrations augmentant également à l'approche du barrage. Ces résultats indiquent que les conditions d'oxydoréduction sont l'un des paramètres clés du contrôle de la remobilisation du P sédimentaire vers la colonne d'eau. À l'opposé, le P associé aux fractions de la matière organique et de l'aluminium ne semble quant à lui ne pas évoluer spatialement de façon significative.

---

Tous droits réservés © Revue des sciences de l'eau, 2017. Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter en ligne. [<https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>]

---

**Érudit**

Cet article est diffusé et préservé par Érudit.

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. [www.erudit.org](http://www.erudit.org)

# DISTRIBUTION SPATIALE ET MOBILITÉ DU PHOSPHORE SÉDIMENTAIRE DANS UNE RETENUE HYDROÉLECTRIQUE

*Spatial distribution and mobility of sedimentary phosphorus in a hydroelectric reservoir*

---

ANNE RAPIN<sup>1\*</sup>, MARION RABIET<sup>1</sup>, MALGORZATA GRYBOS<sup>1</sup>, BRICE MOURIER<sup>2</sup>, ALEXIS FAY<sup>1</sup>, TIM KESTENS<sup>3</sup>, VÉRONIQUE DELUCHAT<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Limoges, Groupement de Recherche Eau Sol Environnement (GRESE), 123, avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France

<sup>2</sup>Université de Lyon, UMR 5023, Laboratoire d'Écologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés, Université Lyon 1, ENTPE, CNRS, 3, rue Maurice Audin, 69518 Vaulx-en-Velin, France

<sup>3</sup>EDF-DPIH, Unité de Production Centre, 10, allée de Faugeras, BP 90016, 87067 Limoges Cedex 9, France

Reçu le 5 octobre 2016, accepté le 11 avril 2017

---

## RÉSUMÉ

Malgré la réduction des rejets de phosphore (P) dans l'environnement, les efflorescences phytoplanctoniques sont toujours observées dans un grand nombre de masses d'eau. C'est notamment le cas dans les retenues de barrage où la perturbation de la continuité sédimentaire peut conduire à une accumulation importante de phosphore au sein du compartiment sédimentaire. Ainsi, pour lutter contre l'eutrophisation, une meilleure connaissance de la distribution, de la réactivité et de la mobilité du P sédimentaire s'avère indispensable. Dans ce contexte, les sédiments de surface de la retenue de Champanglard (Creuse, France) ont été prélevés en différents points selon un gradient amont/aval. Une caractérisation physico-chimique (granulométrie; teneurs en P, Fe, Al, matière organique; fractionnement chimique du P suivant le protocole de RYDIN et WELCH [1998]) a été effectuée afin d'évaluer le potentiel de relargage de P de ces sédiments. Les résultats montrent une évolution de la concentration et de la distribution du P dans les sédiments

de surface dans la retenue de l'amont vers l'aval (de 1,5 à 2,3 mg P·g<sup>-1</sup>), qui semble corrélée avec l'évolution de la granulométrie. L'analyse du fractionnement chimique a montré que le P était majoritairement lié aux oxyhydroxydes de Fe et Mn amorphes (66 %), ces concentrations augmentant également à l'approche du barrage. Ces résultats indiquent que les conditions d'oxydoréduction sont l'un des paramètres clés du contrôle de la remobilisation du P sédimentaire vers la colonne d'eau. À l'opposé, le P associé aux fractions de la matière organique et de l'aluminium ne semble quant à lui ne pas évoluer spatialement de façon significative.

**Mots-clés :** *Eutrophisation, retenue de barrage, sédiment, phosphore, fractionnement chimique.*

## ABSTRACT

Despite the reduction of phosphorus (P) discharged into the environment, phytoplankton blooms are still observed in many water bodies, especially in dam reservoirs where the disturbance of sediment continuity could lead to a significant accumulation of sedimentary phosphorus. Thus, a better understanding of the distribution, reactivity and mobility of sedimentary P is essential in the control of eutrophication. In this context, the surface sediments of Champsanglard reservoir (Creuse, France) were sampled at different points along an upstream/downstream gradient. A physicochemical characterization (particle size; P, Fe, Al and organic matter content; P fractionation following the modified protocol of RYDIN and WELCH [1998]) was conducted to assess the potential leaching of P from the sediment. Results show an evolution of the concentration and distribution of P within the dam reservoir from upstream to downstream (from 1.5 to 2.3 mg P·g<sub>dw</sub><sup>-1</sup>), potentially correlated with the particle size. Chemical fractionation results show that P was predominantly associated with amorphous Fe and Mn oxyhydroxides (66%) and concentrations increased with distance down-reservoir. This result suggests that the redox conditions are one of the key parameters controlling the remobilization of sedimentary P into the water column. In contrast, P bound to the organic matter and Al fractions did not show any significant variations in spatial distribution.

**Key Words:** *Eutrophication, dam reservoir, sediment, phosphorus, chemical fractionation.*

## 1. INTRODUCTION

Le phosphore (P) est un nutriment indispensable à la production primaire en milieu aquatique et contrôle directement les phénomènes d'eutrophisation en milieu continental (CARPENTER, 2008; SCHINDLER, 1974; SCHINDLER *et al.*, 2008). À partir de la moitié du 20<sup>e</sup> siècle, son utilisation intensive dans les détergents et fertilisants a conduit à son enrichissement dans les milieux aquatiques, faisant de l'eutrophisation une problématique prioritaire au niveau mondial (SMITH et SCHINDLER, 2009). La diminution des entrants en P dans les milieux aquatiques, que ce soit par l'amélioration des dispositifs de traitements des eaux ou par l'interdiction d'utilisation des phosphates dans les détergents, ne suffit pas à éviter les proliférations algales dans un grand nombre de retenues.

Depuis la révolution industrielle, le nombre de barrages n'a cessé d'augmenter à travers le monde, atteignant actuellement 58 402 barrages d'au moins 15 m de hauteur (CIGB, 2016).

Aujourd'hui encore, le nombre de barrages en construction est en constante augmentation en raison des demandes en eau et en électricité croissantes (ZARFL *et al.*, 2015). Ces barrages entraînent des discontinuités hydrologiques et modifient le transport des sédiments, matières en suspension et composés dissous, le long des cours d'eau (FRIEDL et WÜEST, 2002; VÖRÖSMARTY *et al.*, 2003). L'augmentation du temps de résidence des masses d'eau et la diminution des phénomènes de turbulence favorisent la sédimentation des particules en suspension et le stockage d'éléments biogènes (BARTOSZEK et KOSZELNIK, 2016; SOW *et al.*, 2016). Le P possède une forte affinité avec la fraction particulaire, ainsi l'accumulation de sédiment au sein des retenues crée une charge interne en P, potentiellement remobilisable vers la colonne d'eau. MAAVARA *et al.*, (2015) estiment qu'en 2000, 12 % de la charge globale en P des rivières était stockée dans les retenues de barrage, pouvant atteindre 17 % en 2030.

Le P se trouve sous différentes formes au sein du sédiment, il peut être lié aux oxyhydroxydes de Fe, Al, Mn, au Ca, à la matière organique ou inclus, précipité et/ou adsorbé à la surface de minéraux (PETTERSSON *et al.*, 1988). La stabilité de la plupart de ces différentes formes est principalement contrôlée par les conditions physicochimiques du milieu.

Cette étude s'intéresse à la caractérisation spatiale et à la spéciation du P sédimentaire dans le contexte d'une retenue de barrage. L'analyse de la spéciation du P et des paramètres physicochimiques influençant chaque fraction fournira une meilleure connaissance du système et des mécanismes de mobilisation et de relargage du P. L'ensemble de ces données apportera des outils utiles aux futures politiques de gestion et de remédiation de ces milieux.

## 2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

### 2.1 Site d'étude

La retenue de Champsanglard, située dans le département Creuse en France (Figure 1) et sur la rivière Creuse, a été mise en service en 1984 par le groupe EDF. Haut de 19,4 m et long de 102 m, le barrage à contrefort crée une retenue d'une superficie de 55 ha et d'un volume total de 4,2 hm<sup>3</sup>, avec un temps de séjour moyen des eaux estimé à 3,5 jours. Les eaux de cette retenue sont classées comme étant de qualité « moyenne » concernant le P total (MEDDE, 2015) et qualifiées comme étant en « bon état » par le ministère des Affaires sociales et de la Santé. Pourtant, chaque année elle fait l'objet d'interdictions de baignade causées par le développement important de cyanobactéries (>100 000 cell·mL<sup>-1</sup>) et représente donc un site pertinent pour l'étude du P sédimentaire en vue de son rôle potentiel dans le processus d'eutrophisation.

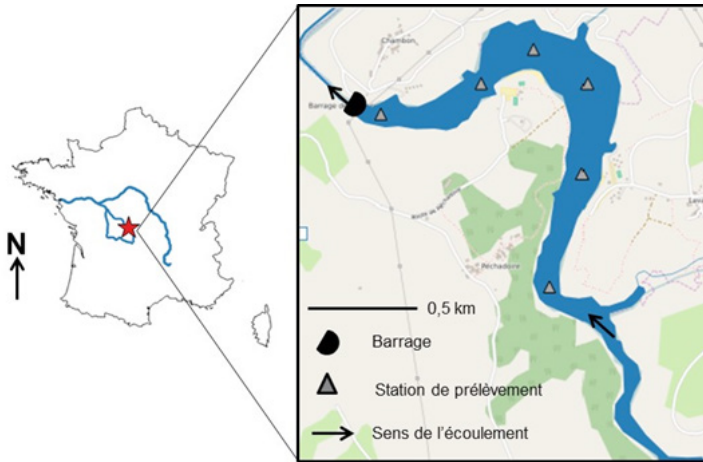


Figure 1. Localisation de la retenue de Champsanglard (Creuse, France) et des points de prélèvements.  
Location of Champsanglard reservoir (Creuse, France) and of sediment sampling points.

## 2.2 Échantillonnage et caractérisation

Les sédiments de surface (jusqu'à 10 cm de profondeur) ont été prélevés en mars 2016 à l'aide d'une benne de type EKMAN en 6 points de la retenue (Figure 1). Après homogénéisation, les échantillons ont été conservés à 4 °C jusqu'à leur arrivée au laboratoire, puis lyophilisés ou séchés à 105 °C et tamisés à 2 mm.

L'analyse granulométrique a été effectuée par diffraction laser en voie humide avec un Mastersizer 3000® (Laboratoire GEHCO, Université de Tours, France). Les teneurs en matière organique (HEIRI *et al.*, 2001), P total (RUBAN *et al.*, 2001) et le fractionnement chimique séquentiel du P (protocole modifié de RYDIN et WELCH (1998), [Figure 2]) ont été analysés. Le dosage du P a été réalisé suivant la méthode normalisée NFT90-023 (MURPHY et RILEY, 1962), et les éléments majeurs Ca, Al, Fe, Mg, Mn ont été analysés par spectromètre d'émission atomique. Les limites de quantifications respectives sont les suivantes : 25  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 2,4  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 4  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 6  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 0,2  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 1,4  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

## 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 3.1 Caractéristiques générales du sédiment

Le diamètre médian (D50) des sédiments de la retenue de Champsanglard est compris entre 19 et 45  $\mu\text{m}$  (Figure 3). Ces sédiments limoneux-sableux montrent une granulométrie décroissante de l'amont vers l'aval, qui reflète la baisse d'hydrodynamisme induite par la présence du barrage. Ils ont des teneurs en matière organique de 20 % qui sont stables dans l'ensemble de la retenue. Ces sédiments sont riches en Fe et Al mais pauvres en Ca (Tableau 1), ce qui reflète la composition des roches métamorphiques et volcaniques du bassin versant de la retenue.

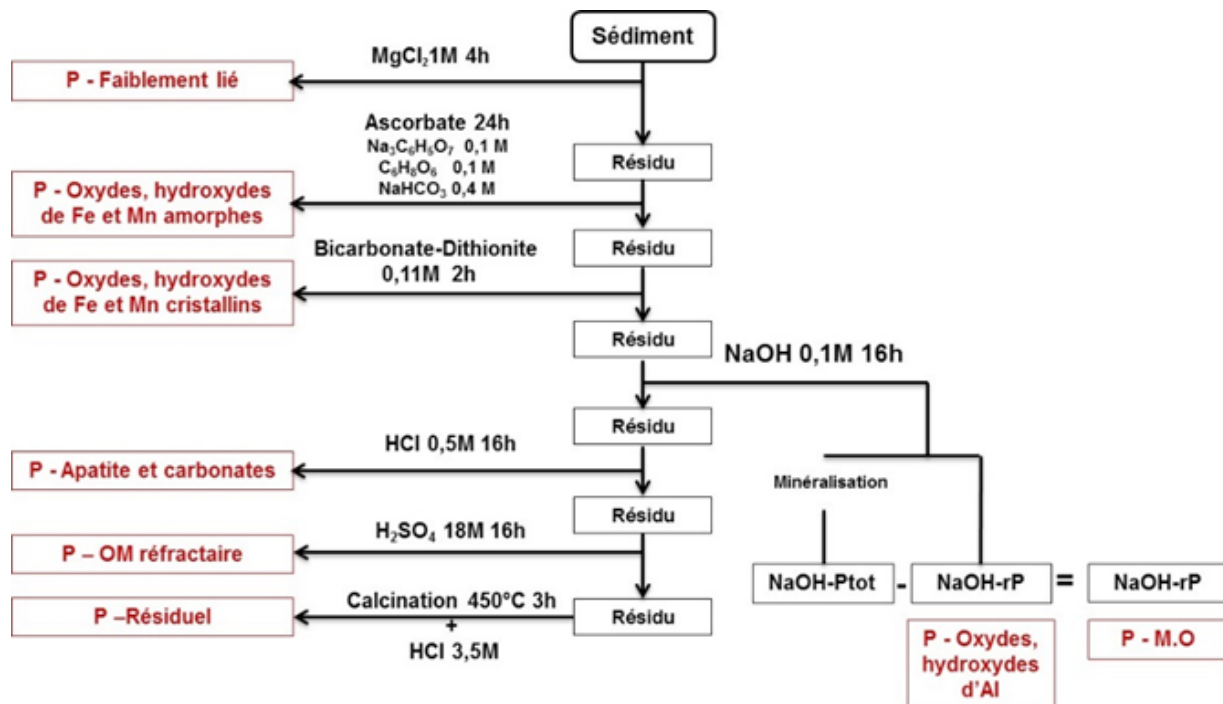


Figure 2. Protocole d'extractions séquentielles modifié d'après RYDIN et WELCH (1998).  
Chemical sequential extraction procedure modified from RYDIN and WELCH (1998).

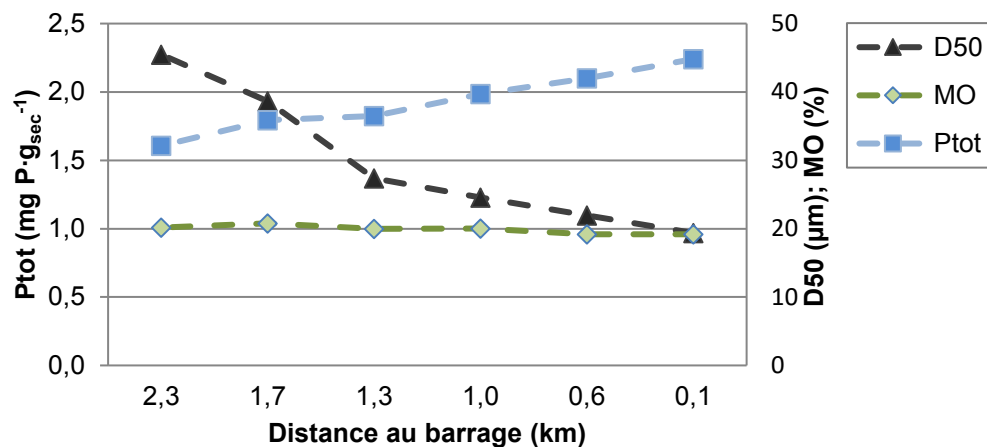


Figure 3. Évolution spatiale des teneurs en P total (Ptot), en matière organique (MO) et de la granulométrie (D50) des sédiments de la retenue de Champsanglard.  
Spatial evolution of the total P (Ptot), organic matter (MO) and particle size (D50) in the Champsanglard reservoir sediment.

Tableau 1. Teneurs en Al, Ca, Fe, Mg et Mn des sédiments de la retenue de Champsanglard.  
Table 1. Concentrations of Al, Ca, Fe, Mg and Mn of Champsanglard sediments.

Point d'échantillonnage	Distance au barrage (km)	Teneur (mg·g <sup>-1</sup> )							
		Al	±	Fe	±	Mg	±	Mn	±
A	0,13	76	6	38	2	8,3	0,1	1,1	0,0
B	0,64	96	19	44	8	10,0	0,5	1,2	0,1
C	0,99	89	7	38	4	10,3	0,5	1,2	0,2
D	1,27	83	2	39	2	8,8	0,0	1,0	0,0
E	1,73	62	12	35	8	7,7	0,4	1,2	0,1
F	2,28	49	5	33	2	8	2	1,5	0,3

Les concentrations en P total varient de 1,6 à 2,2 mg P·g<sup>-1</sup> de l'amont vers l'aval de la retenue (Figure 3). L'enrichissement des sédiments en P vers le barrage est inversement corrélé avec la granulométrie (LUCAS *et al.*, 2015), car les particules les plus fines sont les plus réactives. De plus, par rapport à d'autres sédiments de granulométrie similaire, les teneurs en P de ces sédiments sont élevées (DERRAZ *et al.*, 2005; LIU *et al.*, 2015).

### 3.2 Fractionnement chimique du P

Le P est lié majoritairement à la fraction d'oxyhydroxydes de Fe et Mn amorphes (66 %) et à la matière organique (15 %). Les autres fractions représentent des pourcentages inférieurs à 10 % (Figure 4). Seuls 14 % du P sont liés aux fractions difficilement remobilisables que sont les fractions d'oxyhydroxyde d'Al, apatitiques et résiduel. Quatre-vingt-six pourcent du P sont liés aux compartiments remobilisables : fractions liées à la matière

organique et aux oxyhydroxydes de Fe et Mn amorphes et cristallins. Le P lié à la matière organique peut être libéré vers la colonne d'eau par les processus de minéralisation. De la même façon, en milieu anoxique, la réduction du Fe et du Mn entraîne la dissolution des oxyhydroxydes et la libération du P associé. Cependant, des réactions secondaires au sein du sédiment ou dans l'eau à l'interface eau/sédiment (réoxydation du Fe<sup>2+</sup> en Fe<sup>3+</sup> et reprécipitation des oxyhydroxydes de Fe et Mn et du P associé, adsorption du P à la surface de particules minérales ou organiques) peuvent maintenir le P dans le compartiment sédimentaire.

L'augmentation de la teneur en P total de l'amont vers l'aval du barrage est soutenue par l'augmentation du P lié aux oxyhydroxydes de Fe et Mn amorphes de 0,64 à 1,16 mg P·g<sup>-1</sup>, ces phases porteuses étant majoritairement présentes dans les granulométries les plus fines (STONE et ENGLISH, 1993).

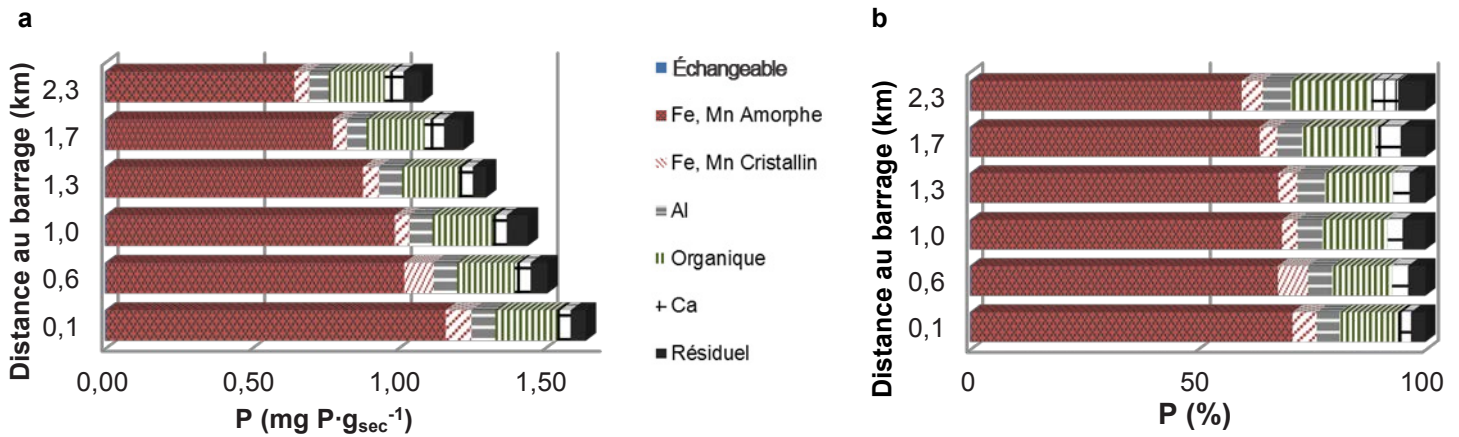


Figure 4. Évolution spatiale du fractionnement chimique du P au sein des sédiments de la retenue de Champsanglard : a) en mg P·g<sup>-1</sup> et b) en pourcentage.

Spatial evolution of the chemical fractionation of P in the Champsanglard reservoir sediments: a) in mg P·g<sup>-1</sup>, and b) in percentage.

## 4. CONCLUSION

Les sédiments de la retenue de Champsanglard sont caractérisés par de fortes teneurs en P dont 86 % sont associés à des phases liées aux compartiments potentiellement remobilisables (matière organique, oxyhydroxydes de fer et de manganèse). Les caractéristiques du sédiment varient suivant le gradient longitudinal de l'amont vers l'aval, avec une diminution de la granulométrie et une augmentation de la teneur en P total. Le P présente une forte affinité avec les oxyhydroxydes de Fe et Mn amorphes dont la quantité est plus élevée dans les fractions sédimentaires fines, ce qui explique les plus fortes concentrations en P total observées en aval.

Considérant que la zone susceptible d'interagir avec la colonne d'eau correspond approximativement aux premiers 15 cm et supposant une répartition homogène des sédiments de surface sur l'ensemble de la retenue, le stock de P total serait d'environ 63 g P·m<sup>-2</sup>. Ces données soulignent le rôle majeur du potentiel d'oxydoréduction comme paramètre contrôlant de la mobilité du phosphore sédimentaire, et donc la nécessité de minimiser les conditions anoxiques au sein de la colonne d'eau.

## REMERCIEMENTS

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de la Chaire Grandes Retenues et Qualité des Eaux (<http://fondation.unilim.fr/chaire-grqe>), financée par Électricité de France et la Fondation Partenariat de l'Université de Limoges. Nous remercions Yoann Gérard, Karine Cleries, Emmanuelle Ducloux et Patrice Fondanèche pour leur aide sur le terrain et/ou dans les analyses.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARTOSZEK L. et P. KOSZELNIK (2016). The qualitative and quantitative analysis of the coupled C, N, P and Si retention in complex of water reservoirs. *SpringerPlus*, 5, 1-15.
- CARPENTER S.R. (2008). Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 105, 11039-11040.
- COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES (CIGB) (2016). *World Register of Dams. General Synthesis*. [http://www.icold-cigb.org/GB/World\\_register/general\\_synthesis.asp](http://www.icold-cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp) (consultation le 5 septembre 2016).
- DERRAZ M., L. BOUMNICH, B. NAJI et A. DAUTA (2005). Le problème des blooms de *Microcystis* dans la retenue du barrage eutrophe El Kansera (Maroc) : caractéristiques physiologiques et biodisponibilité du phosphore des sédiments. *Acta Bot. Gall.*, 152, 91-104.
- FRIEDL G. et A. WÜEST (2002). Disrupting biogeochemical cycles - Consequences of damming. *Aquat. Sci.*, 64, 55-65.
- HEIRI O., A.F. LOTTER et G. LEMCKE (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. Paleolimnol.*, 25, 101-110.
- LIU Q., S. LIU, H. ZHAO, L. DENG, C. WANG, Q. ZHAO et S. DONG (2015). The phosphorus speciations in the sediments up- and down-stream of cascade dams along the middle Lancang River. *Chemosphere*, 120, 653-659.

- LUCAS B.T., K. LIBER et L.E. DOIG (2015). Spatial and temporal trends in reservoir physicochemistry and phosphorus speciation within Lake Diefenbaker, a Great Plains reservoir, as inferred from depositional sediments. *J. Great Lakes Res.*, 41 (2), 67-80.
- MAAVARA T., C.T. PARSONS, C. RIDENOUR, S. STOJANOVIC, H.H. DÜRR, H.R. POWLEY et P. VAN CAPPELLEN (2015). Global phosphorus retention by river damming. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 112, 15603-15608.
- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE (MEDDE) (2015). Arrêté du 27 juillet 2015 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement, *Journal officiel de la république française*, n° 0198 du 28 août 2015, p. 15032.
- MURPHY J. et J.P. RILEY (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 27, 31-36.
- PETTERSSON K., B. BOSTRÖM et O.-S. JACOBSEN (1988). Phosphorus in sediments - speciation and analysis. *Hydrobiol.*, 170, 91-101.
- RUBAN V., J.F. LÓPEZ-SÁNCHEZ, P. PARDO, G. RAURET, H. MUNTAU et P. QUEVAUVILLER (2001). Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments - A synthesis of recent works. *Fresenius J. Anal. Chem.*, 370 (2-3), 224-228.
- RYDIN E. et E.B. WELCH (1998). Aluminum dose required to inactivate phosphate in lake sediments. *Water Res.*, 32, 2969-2976.
- SCHINDLER D.W. (1974). Eutrophication and recovery in experimental lakes: implications for lake management. *Science*, 184, 897-899.
- SCHINDLER D.W., R.E. HECKY, D.L. FINDLAY, M.P. STANTON, B.R. PARKER, M.J. PATERSON, K.G. BEATY, M. LYNG et S.E.M. KASIAN (2008). Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 105, 11254-11258.
- SMITH V.H. et D.W. SCHINDLER (2009). Eutrophication science: where do we go from here? *Trends Ecol. Evol.*, 24, 201-207.
- SOW M.M., N. MAJDI, K. MUYLEAERT, M. TACKX, F. JULIEN, J.-L. PROBST, B. MIALET, C. SUTRA, A. PROBST, J.-M. THÉBAULT, M. KENARLIKDJIAN et M. GÉRINO (2016). Retention of nutrients, suspended particulate matter and phytoplankton in a pondage associated with a run-of-the-river type hydroelectric power plant. *Ecohydrol.*, 9, 229-237.
- STONE M. et M.C. ENGLISH (1993). Geochemical composition, phosphorus speciation and mass transport of fine-grained sediment in two Lake Erie tributaries. *Hydrobiol.*, 253, 17-29.
- VÖRÖSMARTY C.J., M. MEYBECK, B. FEKETE, K. SHARMA, P. GREEN et J.P.M SYVITSKI (2003). Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Glob. Planet. Change*, 39 (1-2), 169-190.
- ZARFL C., A.E. LUMSDON, J. BERLEKAMP, L. TYDECKS et K. TOCKNER (2015). A global boom in hydropower dam construction. *Aquat. Sci.*, 77 (1), 161-170.