

**Bienvenue au premier webinaire de la Chaire
Grandes Retenues et Qualité des Eaux**

**Problématique Eutrophisation dans les retenues hydroélectriques
Phosphore sédimentaire**



Université
de Limoges





La Chaire « Grandes Retenues et Qualité des Eaux » a été créée en 2012 par la contribution d'EDF à la Fondation partenariale de l'Université de Limoges



Co-construit avec les gestionnaires.

Cette chaire a pour vocation de concilier les enjeux de recherche et de gestion.



programme de recherche pluridisciplinaire
(hydrologie, chimie de l'environnement, sédimentologie)



FONDATION
UNIVERSITÉ
DE LIMOGES

La Fondation constitue un dispositif stratégique de promotion et de développement de [l'Université de Limoges](#)

ses missions prioritaires :

- formations attractives,
- vie étudiante dynamique,
- recherche d'excellence.



Laboratoire

Peirene



PEIRENE EA 7500

Unité de Recherche de l'Université de
Limoges

Pluridisciplinaire - chimie / biologie - avec
applications à la santé et à l'environnement

4 Equipes dans le domaine biologie / chimie / santé

- Biomolécules, substances naturelles et applications (V. Sol)
- « SylvaLim »
- GAMAA-USC 1061 INRA (V. Blanquet)
- Glycosylation et différenciation cellulaire (A. Maftha)

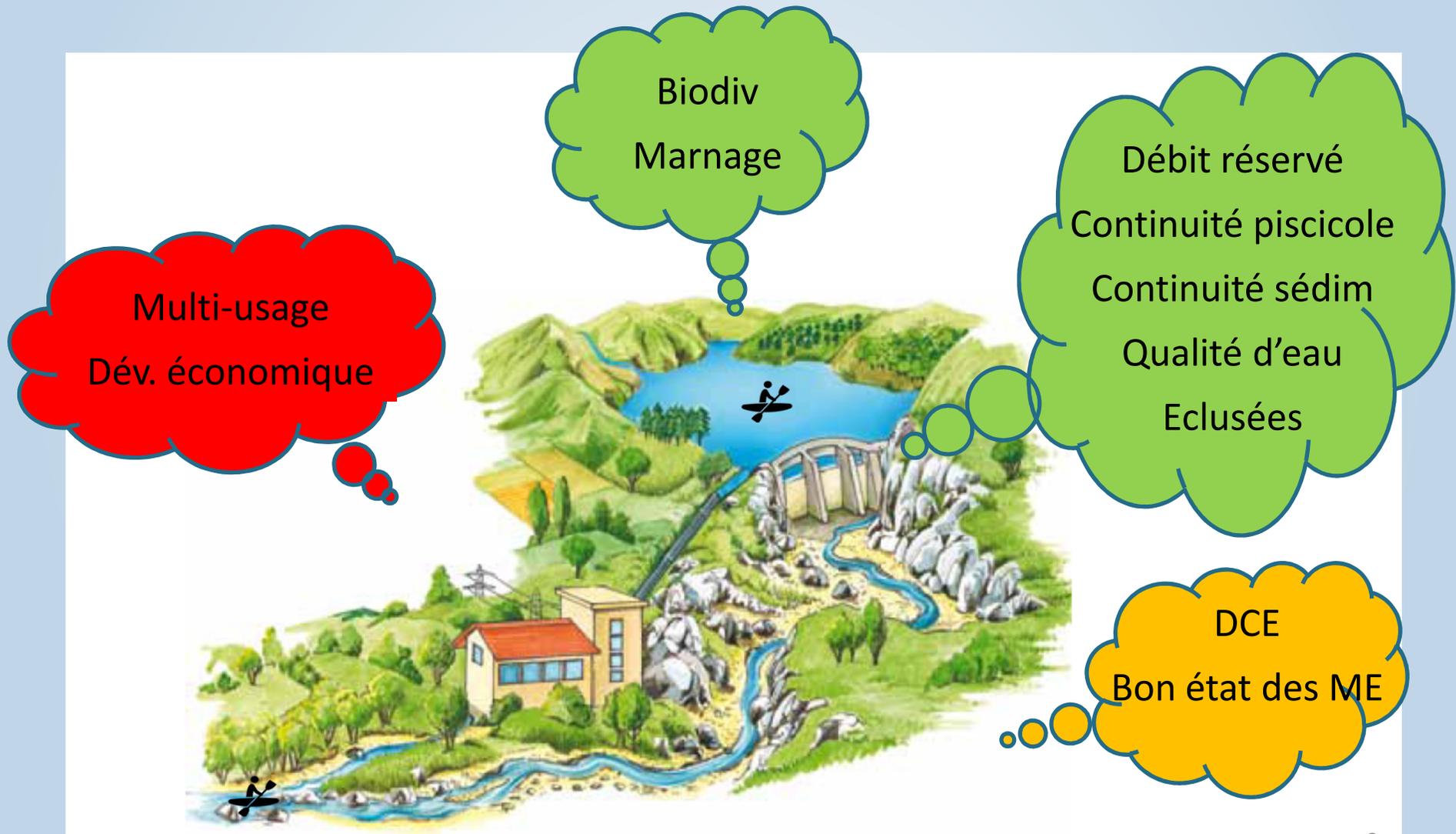
3 équipes dans le domaine de l'eau (PEIRENE EAU)

- Equipe Métrologie et qualité de eaux -URA IRSTEA (G Guibaud)
- Equipe transfert sédiments /sols
- Equipe micropolluants et procédés (M Baudu)



Tim Kestens - **Direction Concessions**, EDF
HYDRO Centre

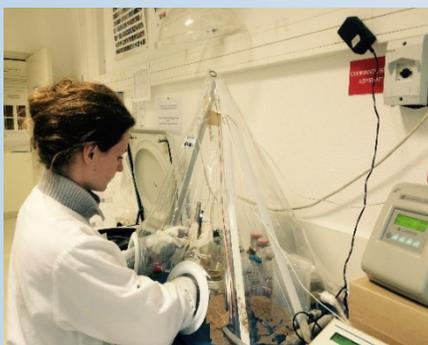
Les enjeux pour





Thématique Sédiment :

- Analyse quantitative et surtout qualitative des sédiments et leur stabilité au cours de leur accumulation dans les retenues de barrage et de leur remobilisation (Thèse 1)
- Mobilité of metals in contaminated sediments of a dam reservoir (Postdoc 1)
- Compréhension des mécanismes de remobilisation d'éléments métalliques au cours du temps pour une gestion durable du stock sédimentaire en contexte de barrage (Thèse 4)



Thématique Phosphore

- Contribution à une meilleure connaissance de la réactivité des sédiments vis-à-vis du phosphore, sorption et relargage, dans le contexte des grandes retenues (Thèse 2)
- Contribution des colloïdes dans la mobilité du phosphore sédimentaire dans les réservoirs aquatiques (Thèse 6)



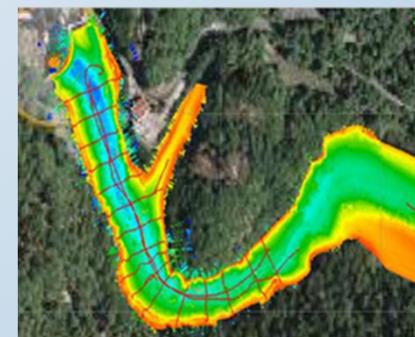
Thématique Matière Organique:

- Outils et méthodes de caractérisation de la matière organique de sédiment (postDoc2)
-)Rôle de la Matière Organique sédimentaire sur les équilibres chimiques des grandes retenues (Thèse 3)



Thématique Échantillonnage:

- Développement des échantillonneurs passifs et spécifiquement 'DGT' (Gradient diffusif en film mince) autour des contaminants inorganiques tels que les métaux et les métalloïdes red-ox sensibles en contexte de barrage (Thèse 5)



Laboratoire

Peirene



Véronique Deluchat – Professeur, Université de Limoges

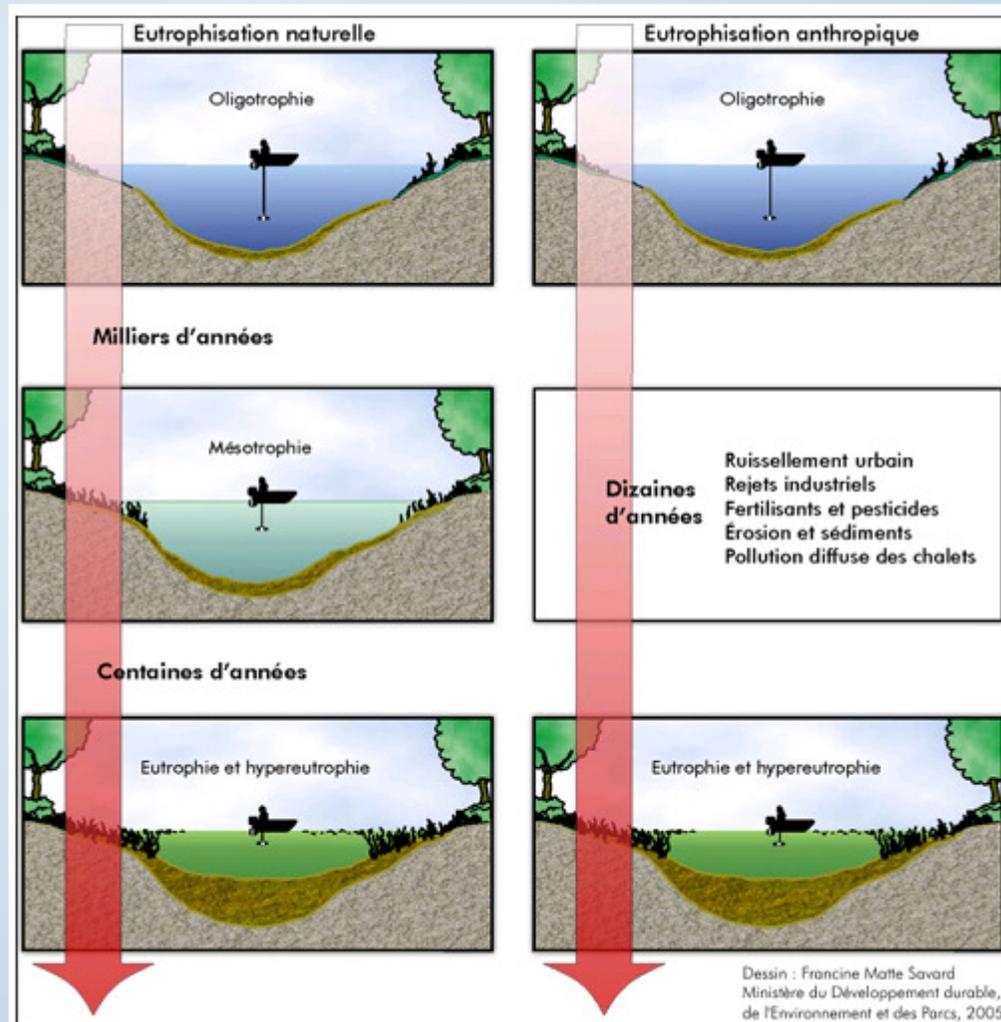
Définition de l'eutrophisation

«trophein» : nourrir ;
« eu » : bien, abondant

- Processus de vieillissement naturel des milieux aquatiques

⇒ lent comblement des cuvettes lacustres

- Évolution accélérée par l'homme



Définition de l'eutrophisation (directive CEE 1991)

Enrichissement de l'eau en éléments nutritifs, notamment des composés de l'azote et/ou du phosphore, provoquant un développement accéléré des algues et des végétaux d'espèces supérieures qui entraîne une perturbation indésirable de l'équilibre des organismes présents dans l'eau et une dégradation de la qualité de l'eau en question.

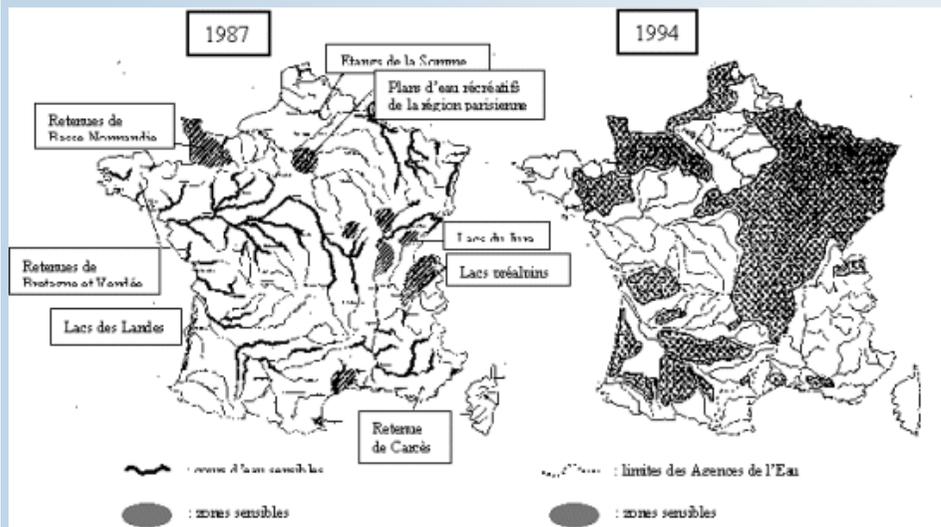
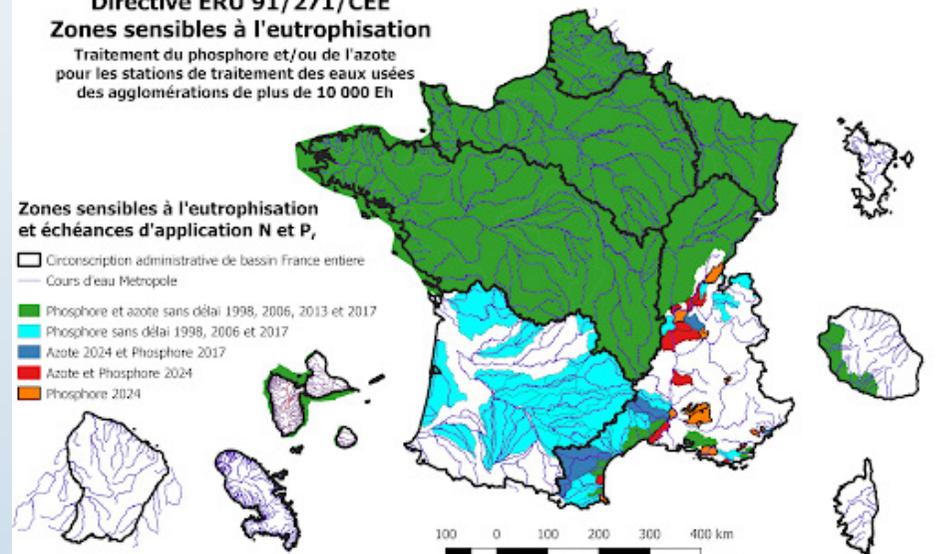


Annexe 4 Les zones sensibles

La liste des zones sensibles est disponible à l'adresse: <http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/services.php>.

Directive ERU 91/271/CEE Zones sensibles à l'eutrophisation

Traitement du phosphore et/ou de l'azote pour les stations de traitement des eaux usées des agglomérations de plus de 10 000 Eh



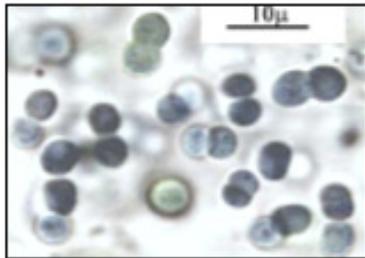
Macrophytes

- Végétaux flottants ou fixés; immergés ou émergés
- Espèces envahissantes : Jussie, Renouée du Japon, Elodée du Canada, Myriophylle du Brésil, Jacinthes d'eau....

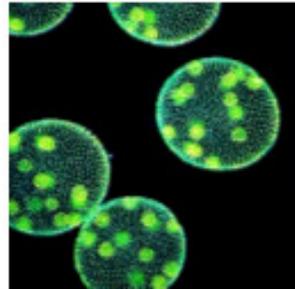


Phytoplankton

- Algues (Chlorophycées, Diatomées...)
- Cyanobactéries



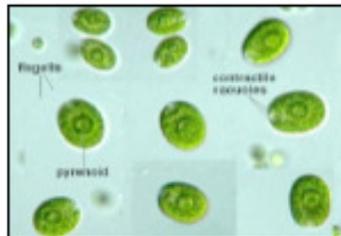
Synechococcus
(Chroococcales)



Volvox
(Volvocales)



Anabaena (nostocales)



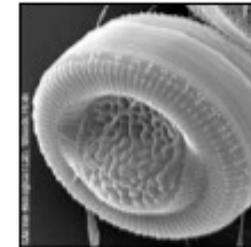
Chlamydomonas
(Volvocales)



Cosmarium
(Zygnematales)



Desmodesmus
(Chroococcales)



Cyclotella
(Diatomées)



Rhodomonas
(Cryptophycées)



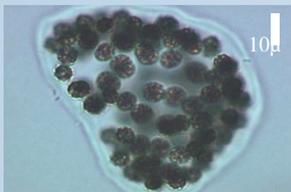
Ceratium
(Dinoflagellés)



Euglena

Cyanobactéries

- Sur terre depuis 3,5 milliards d'années
- Grande variété de formes
 - Unicellulaires, solitaires ou en colonie (*Microcystis*) ; Organisées en trichomes ; Organisées en filaments
- Existence de cellules différenciées ... *mécanismes d'adaptation*
 - Hétérocystes : fixation N₂ atmosphérique
 - Akinètes : formes de résistance
- Déplacement dans la colonne d'eau
 - Vacuoles à gaz
- Planctoniques ou benthiques



Microcystis wesenbergii



Aphanizomenon sp.



Planktothrix agardhii



Anabaena circinalis



Anabaena flos-aquae

Cyanobactéries

- Production de cyanotoxines
 - Différents types de toxines
 - Dermato toxines
 - Hépatotoxines
 - Neurotoxines
 - Action sur différents organes cibles
 - Muqueuses, Foie, Système nerveux



Morts de chiens – été 2017

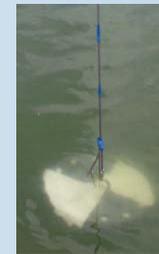
<https://www.lanouvellerepublique.fr/actu/prelevements-et-autopsie-apres-la-mort-de-chiens>

<https://www.lanouvellerepublique.fr/actu/cyanobacteries-attention-danger>

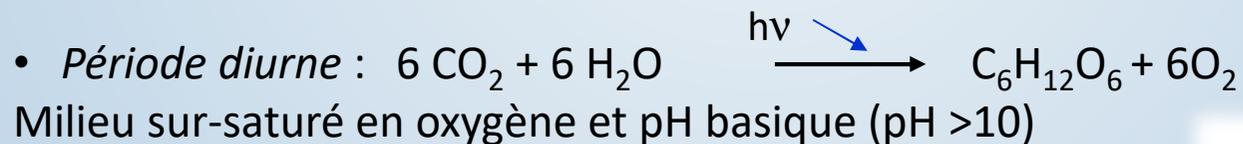
<https://www.consoglobe.com/cyanobacteries-maine-et-loire-chiens-morts-cg>

Eutrophisation : conséquences du développement des macrophytes ou du phytoplancton

- Aspect visuel
- Couverture du système aquatique
 - Transparence nulle :
 - Non respect de la réglementation baignade (< 1m)
 - Photosynthèse bloquée
 - ⇒ milieu sans oxygène ⇒ diminution de la biodiversité



- Bloom phytoplanctoniques
 - Activité photosynthétique très importante :
 - Variations diurnes/nocturnes du pH et des teneurs en oxygène dissous



- *Période nocturne* : consommation O_2 et rejet de CO_2
Milieu anaérobie en fin de nuit ⇒ asphyxie des poissons

→ Baisse de la biodiversité, mortalité piscicole



Eutrophisation : conséquences sanitaires

- Décomposition des plantes aquatiques, algues
 - Consommation d'oxygène \Rightarrow milieu anaérobie
 - H_2S : odeurs, gaz mortel



**Cheval mort en Bretagne, Août 2009 :
la plage aux algues vertes interdite**

- Problème sanitaire lié aux toxines des cyanobactéries
 - Abreuvement des animaux
 - Activités récréatives
 - Production d'eau potable



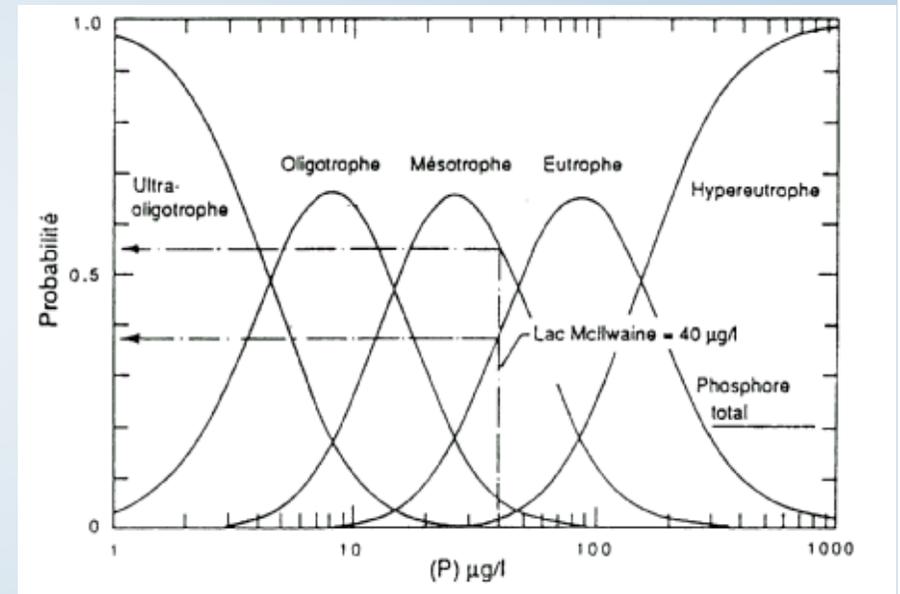
Causes

Azote et Phosphore

- Milieu marin : N facteur limitant
- Eaux douces : P facteur limitant
 - Fixation N₂ par les cyanobactéries
 - Bibliographie: Schindler, 2008

Autres facteurs influençant le développement du phytoplancton et des végétaux

- Temps de résidence
- Hydrodynamique
- Lumière
- Température
- Silice, Salinité, Matière organique...



Rapport OCDE, 1982

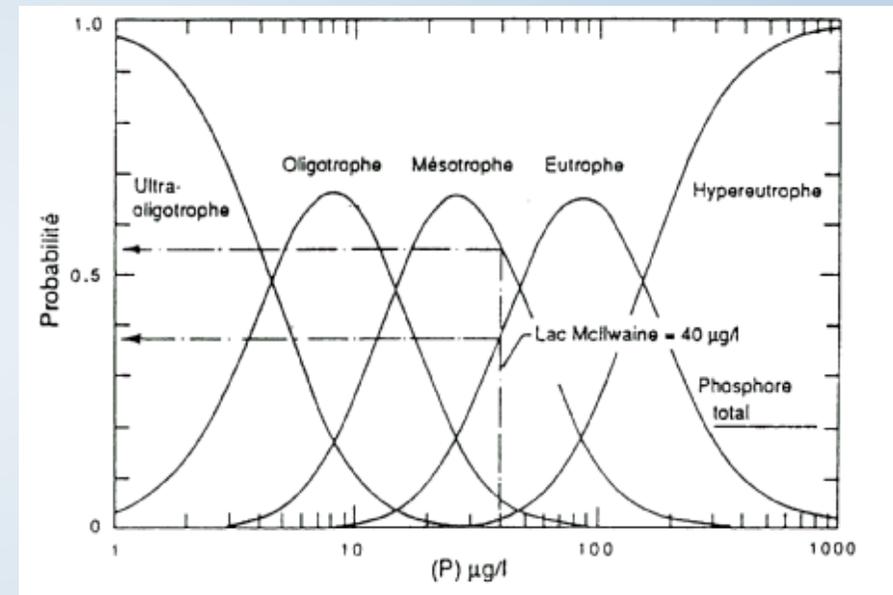
Causes

Azote et Phosphore

- Milieu marin : N facteur limitant
- Eaux douces : P facteur limitant
 - Fixation N_2 par les cyanobactéries
 - Bibliographie: Schindler, 2008

Autres facteurs influençant le développement du phytoplancton et des végétaux

- Temps de résidence
- **Hydrodynamique** → eutrophisation favorisée dans les retenues
- Lumière
- Température
- Silice, Salinité, Matière organique...



Eutrophisation → phénomène très complexe

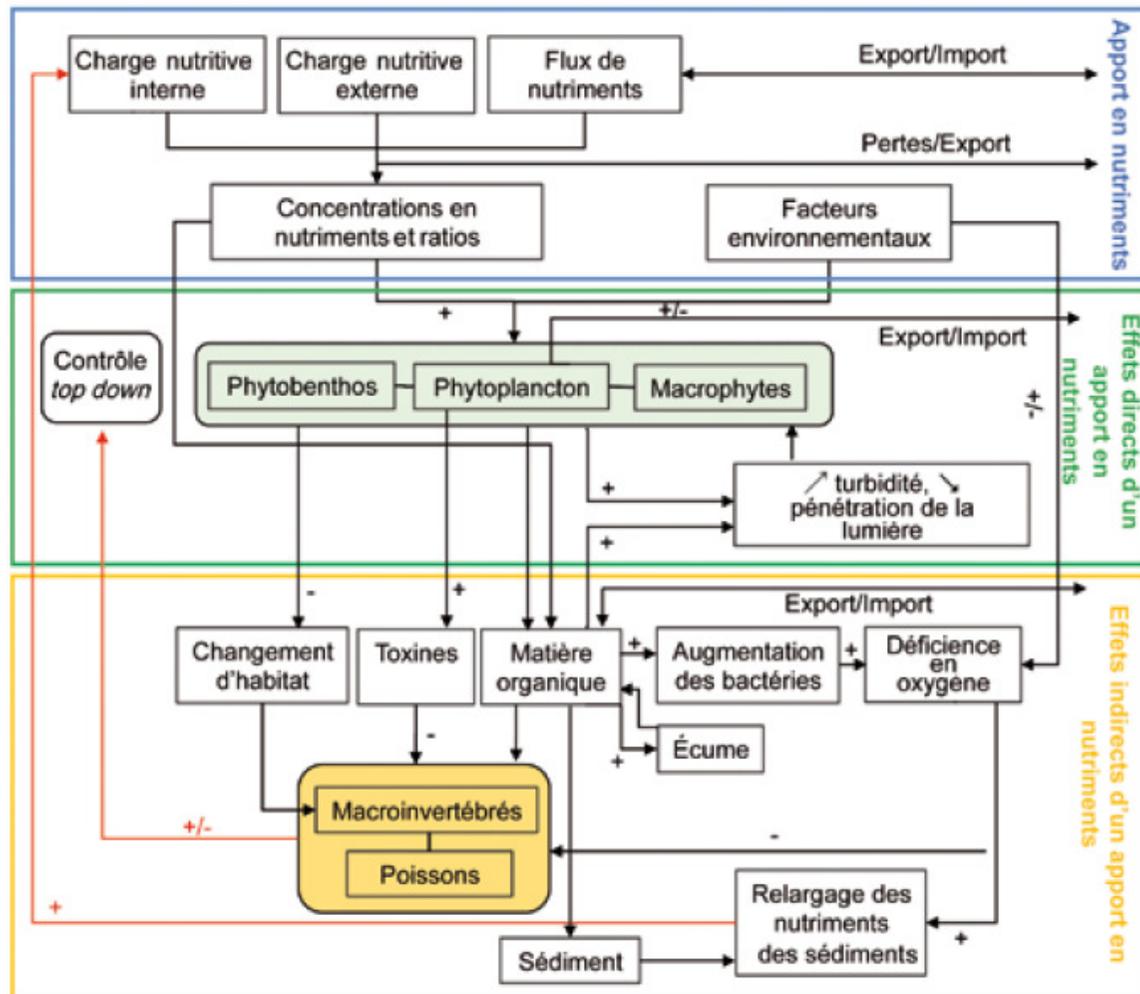


Figure 2.7. Schéma conceptuel de l'eutrophisation, pour tous les types de masses d'eau de surface. En rouge les rétrocontrôles. Version traduite d'après Claussen 2009.

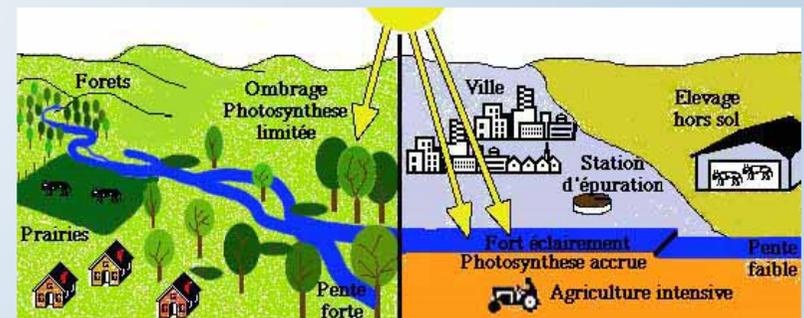
Origine N et P

- **Sources exogènes,**
entrantes via les tributaires des retenues

- Rejets eaux usées domestiques (déjections, détergents)
 - apports ponctuels : STEU
 - apports diffus : ANC
- Rejets agricoles (fertilisants, déjections animales)
- Rejets industriels

- **Sources endogènes**

- Sédiments
- Apports directs
 - Animaux ayant leur habitat sur le plan d'eau
 - Abreuvement
 - Amorçage pour la pêche...



Origine N et P

- **Sources exogènes, entrantes via les tributaires des retenues**

- Rejets eaux usées domestiques (déjections, détergents)

- apports ponctuels : STEU

- apports diffus : ANC

- Rejets agricoles (fertilisants, déjections animales)

- Rejets industriels

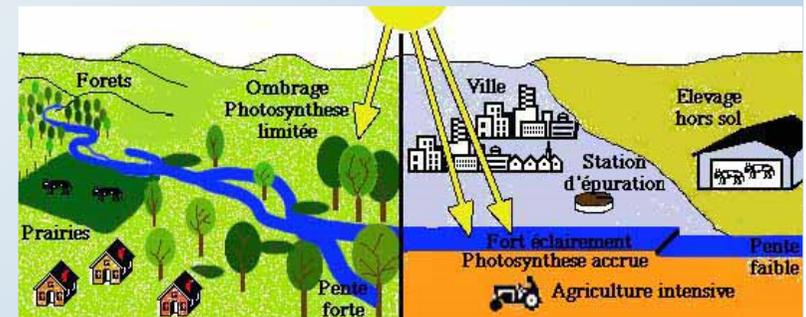
- **Sources endogènes**

- Sédiments

- Apports directs

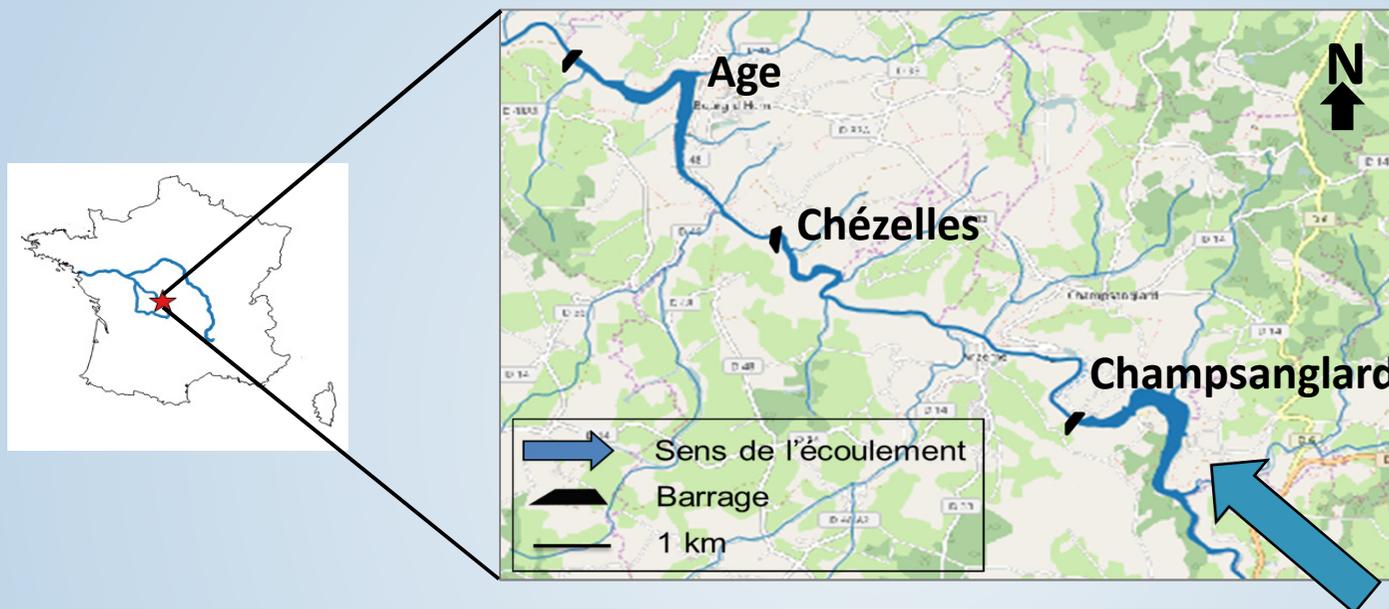
- Animaux ayant leur habitat sur le plan d'eau

- Abreuvement



2. ETUDE DE CAS COMPLEXE DES 3 LACS

Complexe des trois lacs (Creuse)



Retenue de l'Age

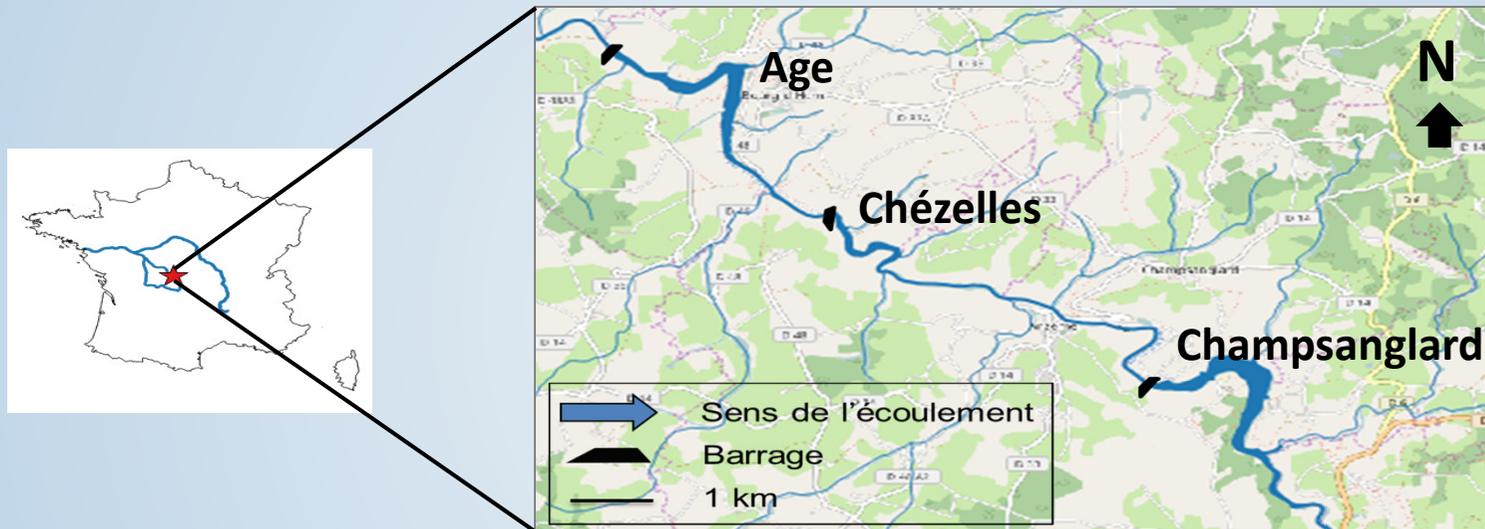


Barrage de Chézelles



Retenue de Champsanglard

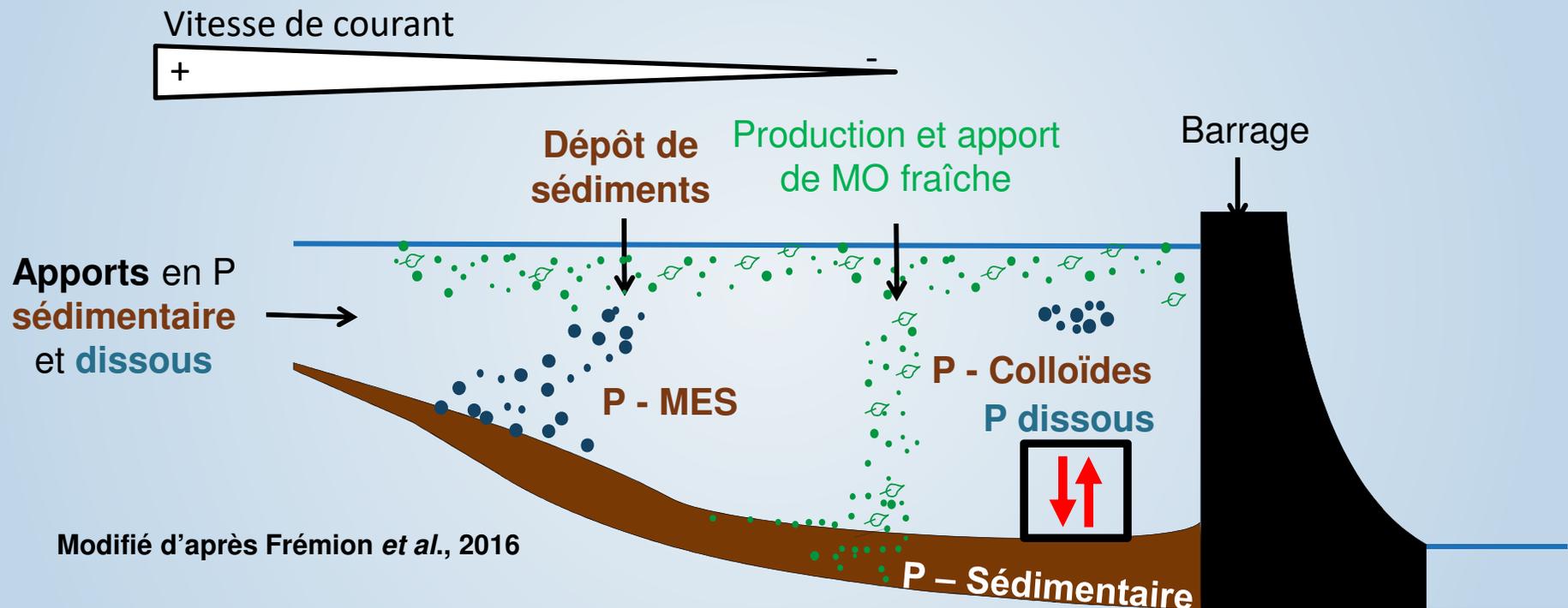
Complexe des trois lacs (Creuse)



	Age	Chézelles	Champsanglard
Mise en service	1981	1985	1984
Gestion	Fil de l'eau ou micro-éclusées		
Hauteur du barrage	19 m		
Surface retenue (km²)	0,38	0,23	0,55
Temps de séjour (jour)	1,7	0,8	3,0
Loisirs	Nautique ; pêche	Pêche	Nautique ; pêche

Retenue de barrage: perturbation des continuités

- Hydrologique → \nearrow temps de séjour, \nearrow T°C, \searrow turbulence, \searrow turbidité
- Sédimentaire → accumulation de sédiments



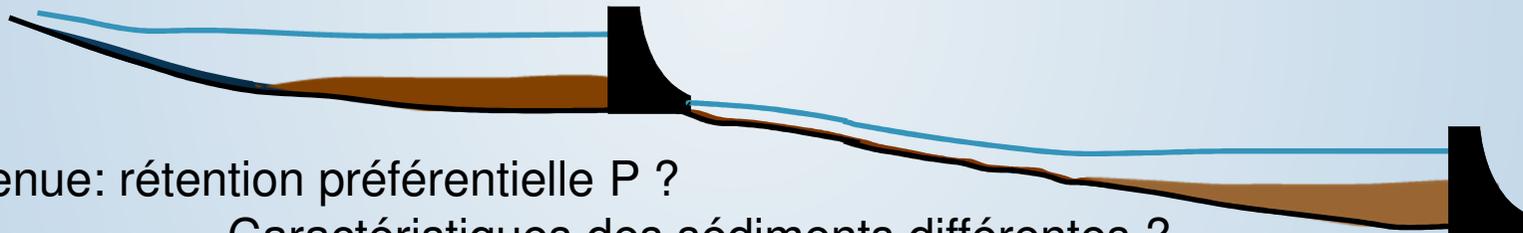
- 12% de la charge globale en P des rivières stockés dans les retenues de barrage
- Charge interne en P sédimentaire potentiellement remobilisable vers la colonne d'eau ?

→ Maintien du processus d'eutrophisation

Problématiques de l'étude

Etude charge interne en phosphore sédimentaire

1. Quel est l'impact de barrages en cascade sur les teneurs et la distribution du P sédimentaire le long d'un continuum fluvial ?
Quels paramètres contrôlent la variabilité spatiale du P ?

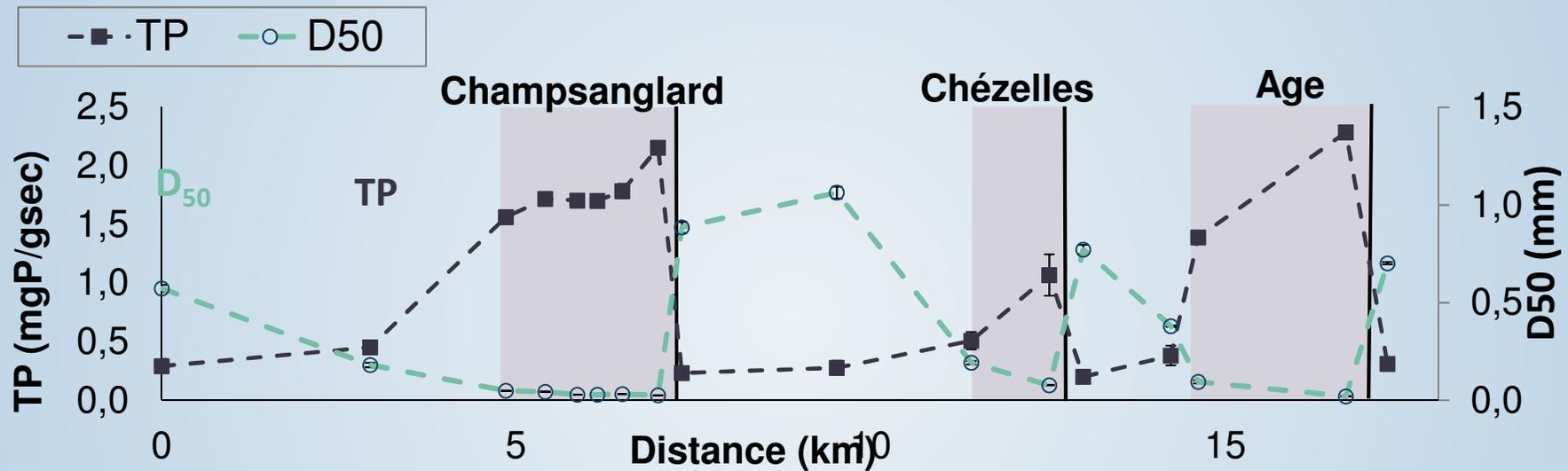


1^{ère} retenue: rétention préférentielle P ?

Caractéristiques des sédiments différentes ?

2. Quel est le risque de mobilisation du P sédimentaire vers la colonne d'eau ?
Les sédiments ont-ils un rôle de puits ou de source de P ?

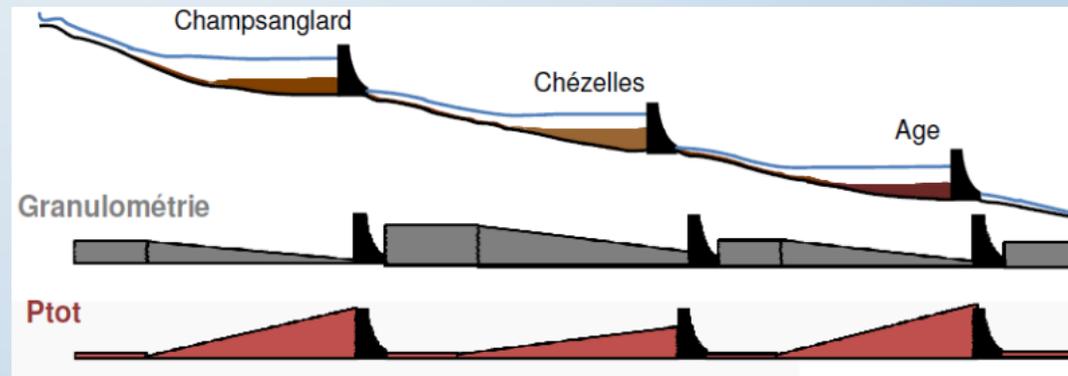
Quel est l'impact de barrages en cascade sur les teneurs et la distribution du P sédimentaire le long du continuum fluvial?



- Retenues : Rétention de sédiments fins

- $[TP]_{\text{rivière}} = 0,31 \pm 0,09 \text{ mg P/gsec}$

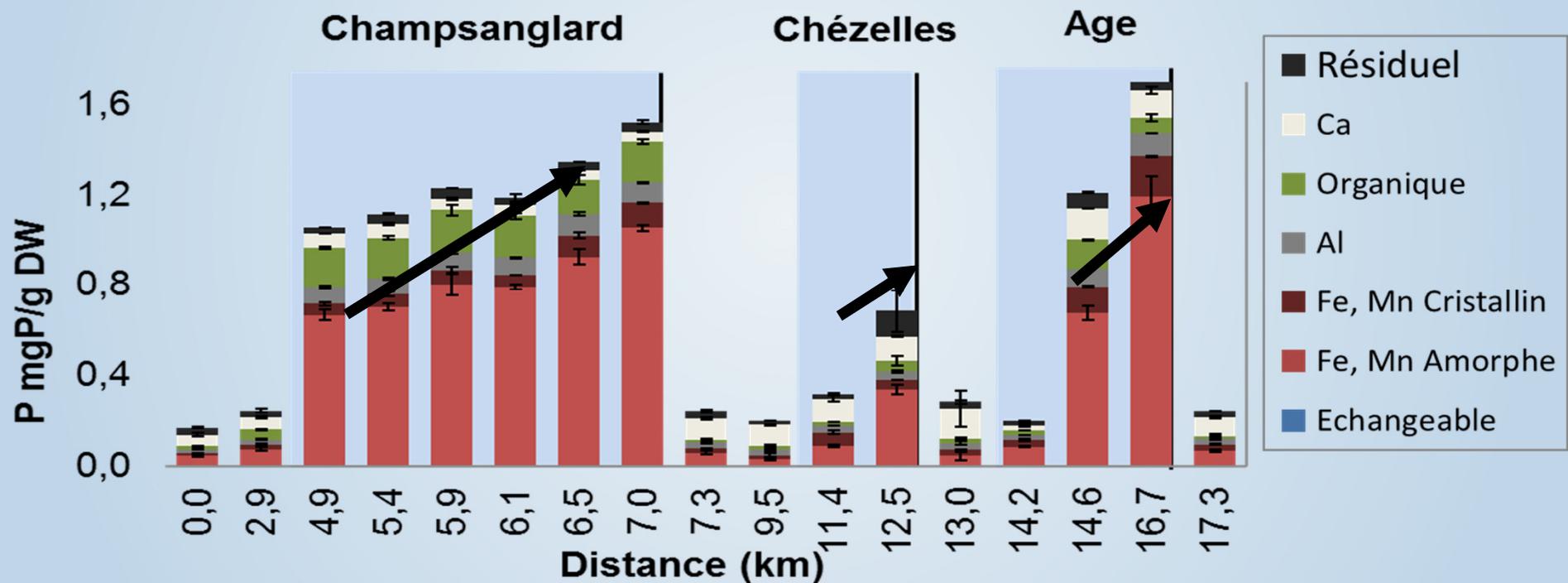
- $[TP]_{\text{retenues}} = 1,59 \pm 0,51 \text{ mg P/g}_{\text{sec}}$



- Dans les retenues : \searrow granulométrie et $[P]$ \nearrow

Quel est l'impact de barrages en cascade sur les teneurs et la distribution du P sédimentaire le long du continuum fluvial ?

Quels paramètres contrôlent la variabilité spatiale du P ?

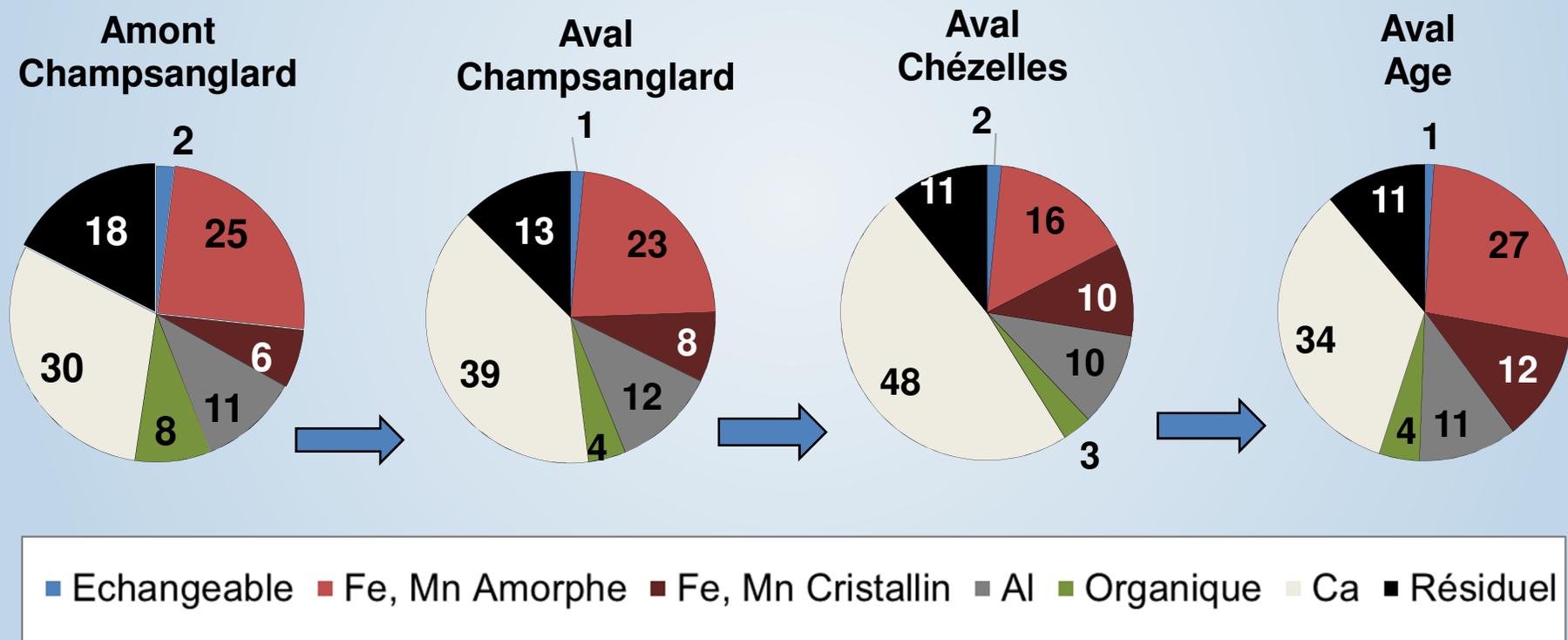


→ Association du P avec oxy-hydroxydes de Fe amorphes dans les particules fines

= facteur principal expliquant l'accumulation du P dans les retenues

Quel est l'impact de barrages en cascade sur les teneurs et la distribution du P sédimentaire le long du continuum fluvial?

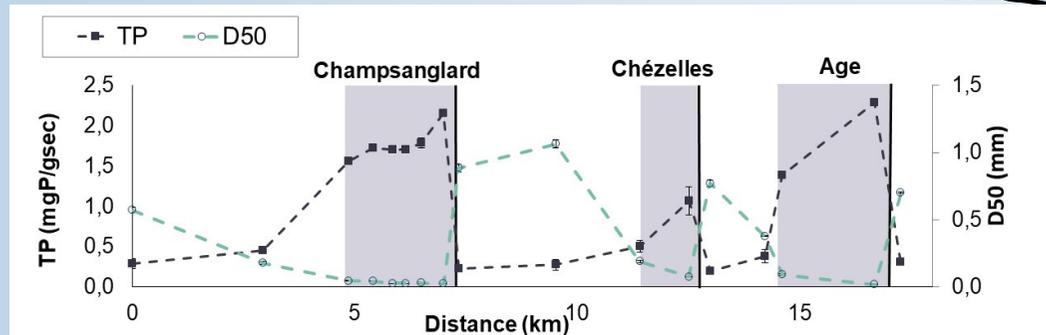
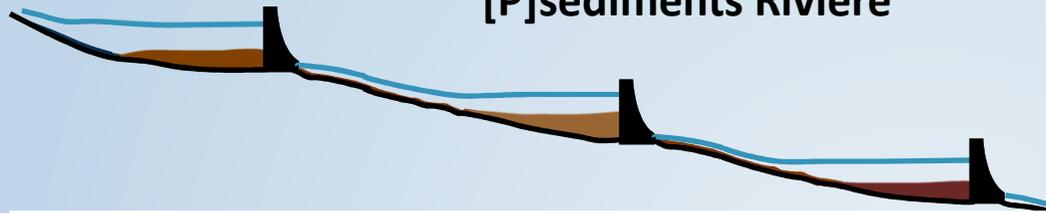
- Distribution du P dans sédiments des tronçons fluviaux



→ Pas d'évolution majeure dans la répartition du P sédimentaire dans les tronçons de rivières inter-barrages

1. Quel est l'impact de barrages en cascade sur les teneurs et la distribution du P sédimentaire le long d'un continuum fluvial ?
2. Quels paramètres contrôlent la variabilité spatiale du P ?

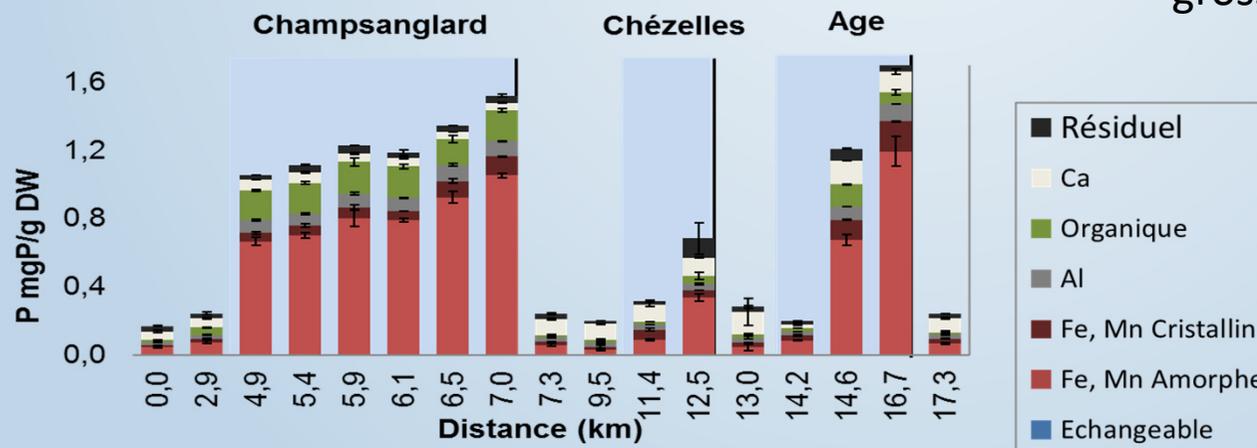
✓ [P]sédiments Retenues > 5
[P]sédiments Rivière



✓ **Distribution du P :**

➤ Retenues : oxydes de Fe/Mn amorphes, particules fines → phase redox sensible

➤ Rivière : calcium, particules plus grossières → phase stable



Objectifs de l'étude

1. Quel est l'impact de barrages en cascade sur les teneurs et la distribution du P sédimentaire le long du continuum fluvial ?
Quels paramètres contrôlent la variabilité spatiale du P ?
2. Quel est le risque de mobilisation du P sédimentaire vers la colonne d'eau ?

Quel est le risque de mobilisation du P sédimentaire vers la colonne d'eau ?

- Fractionnement chimique : Phosphore potentiellement biodisponible



P sous forme dissoute (PO_4) assimilable par les espèces phytoplanctoniques et macrophytes

Phosphore sédimentaire potentiellement mobilisable (PPM)

**P faiblement lié
(échangeable)**

Désorption

**P - Oxy-hydroxydes
Fe/Mn amorphes**

Dissolution réductive

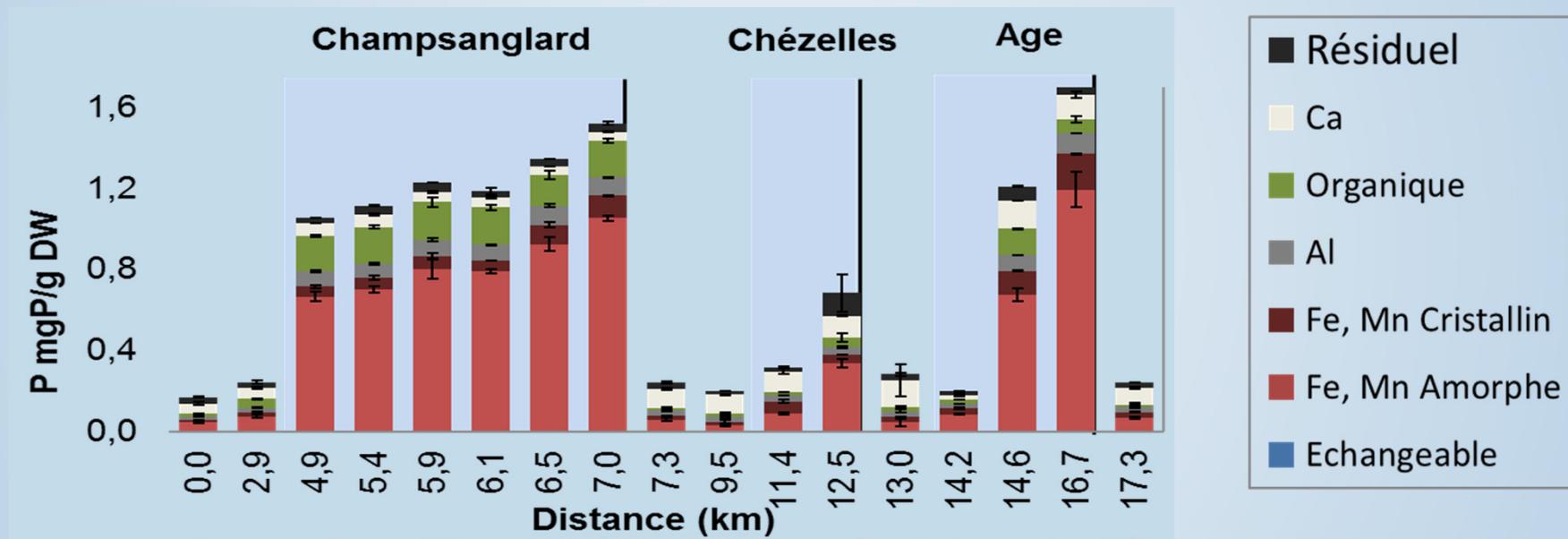
**P-OM
(organique)**

Minéralisation

Quel est le risque de mobilisation du P sédimentaire vers la colonne d'eau ?

➤ Fractionnement chimique :

PPM : Phosphore sédimentaire potentiellement mobilisable



PPM : Retenues

1,24 mg/g_{sec}

0,39 mg/g_{sec}

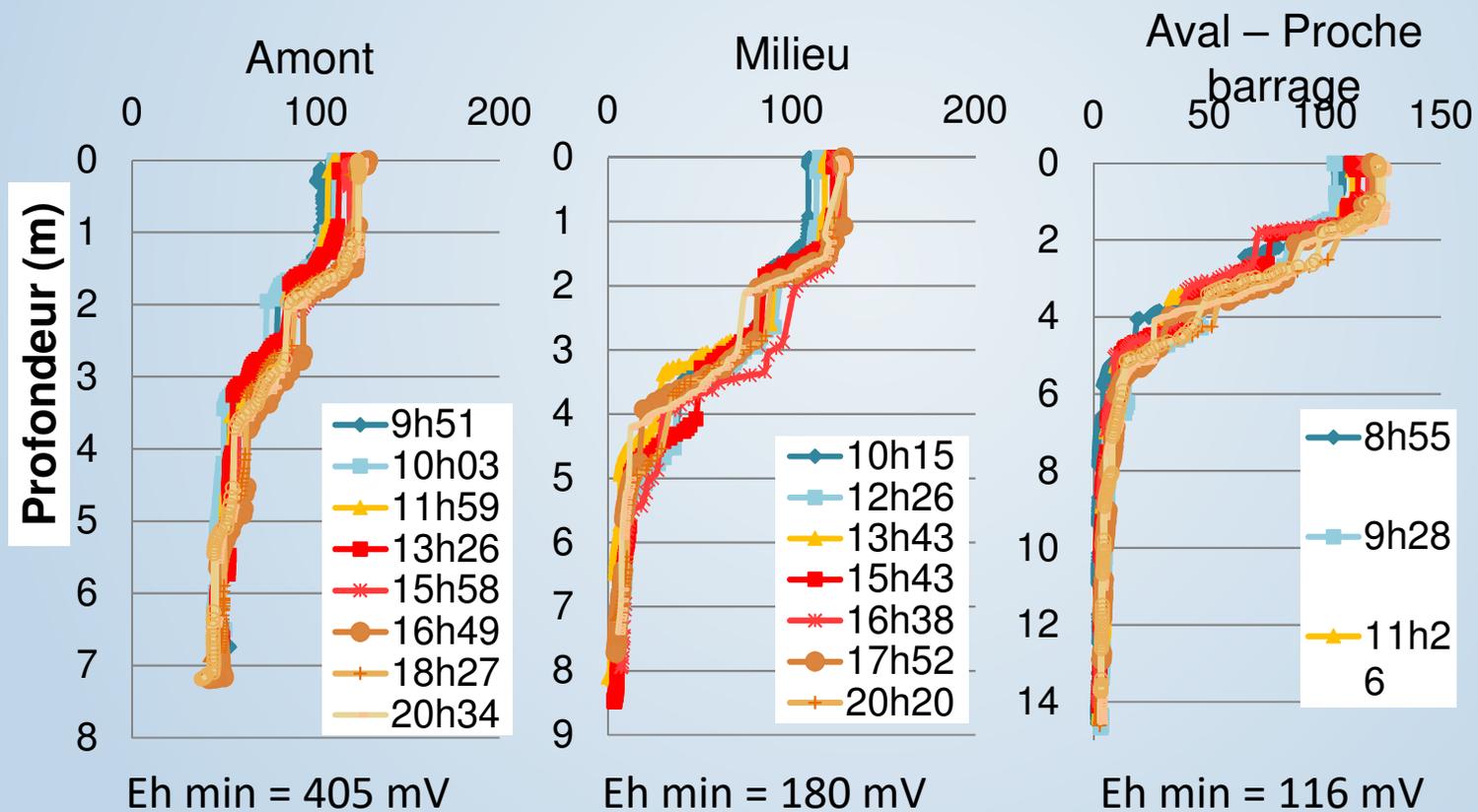
1,26 mg/g_{sec}

31 à 57% du TP

- 79 ± 9 % du PPM : oxy-hydroxydes Fe, Mn amorphes
- Fort potentiel de mobilisation du P en condition anoxique

Quel est le risque de mobilisation du P sédimentaire vers la colonne d'eau ?

- Suivi Oxygène dissous (%) dans la colonne d'eau Champsanglard Août 2016 :



→ Développement de conditions réductrices favorables à la remobilisation du PPM

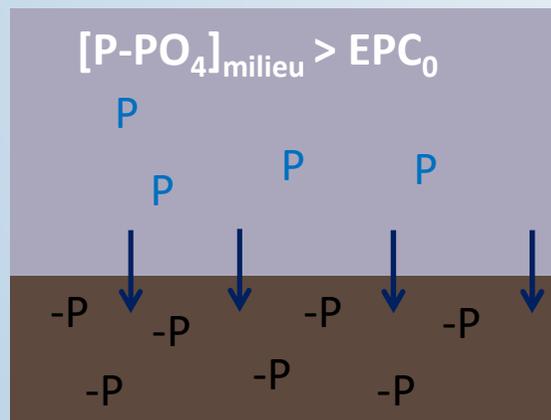
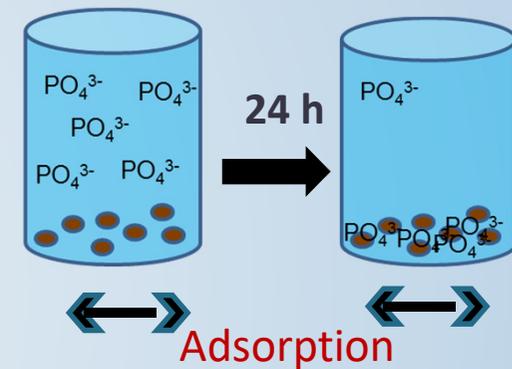
Quel est le risque de mobilisation du P sédimentaire vers la colonne d'eau ?

- Etude d'adsorption : conditions expérimentales
 - Évaluation de la teneur en P qui peut être piégée par le sédiment

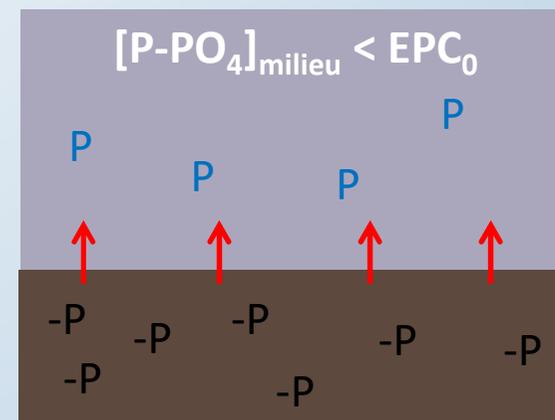
→ Q_m : Capacité d'adsorption maximale en mg P/g sec de sédiment

Quantité de P adsorbé en plus de la teneur initiale en TP

→ EPC_0 : Concentration seuil en P- PO_4 dans la colonne d'eau pour laquelle il n'y a ni adsorption ni désorption de P par le sédiment



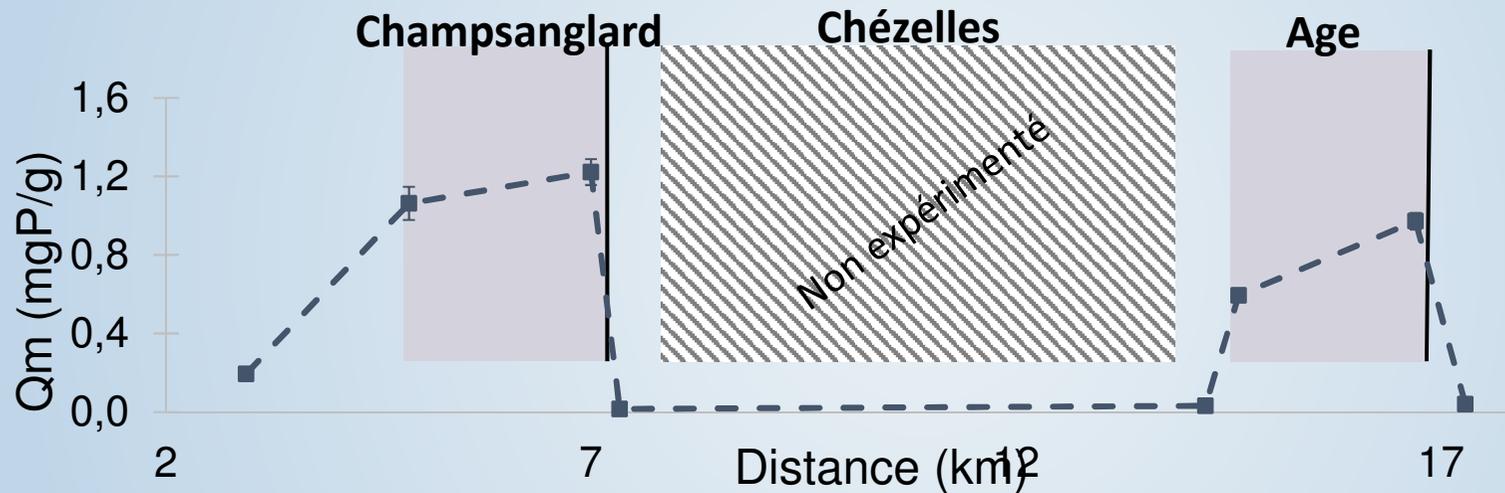
Sédiment = Puits



Sédiment = Source

Quel est le risque de mobilisation du P sédimentaire vers la colonne d'eau ?

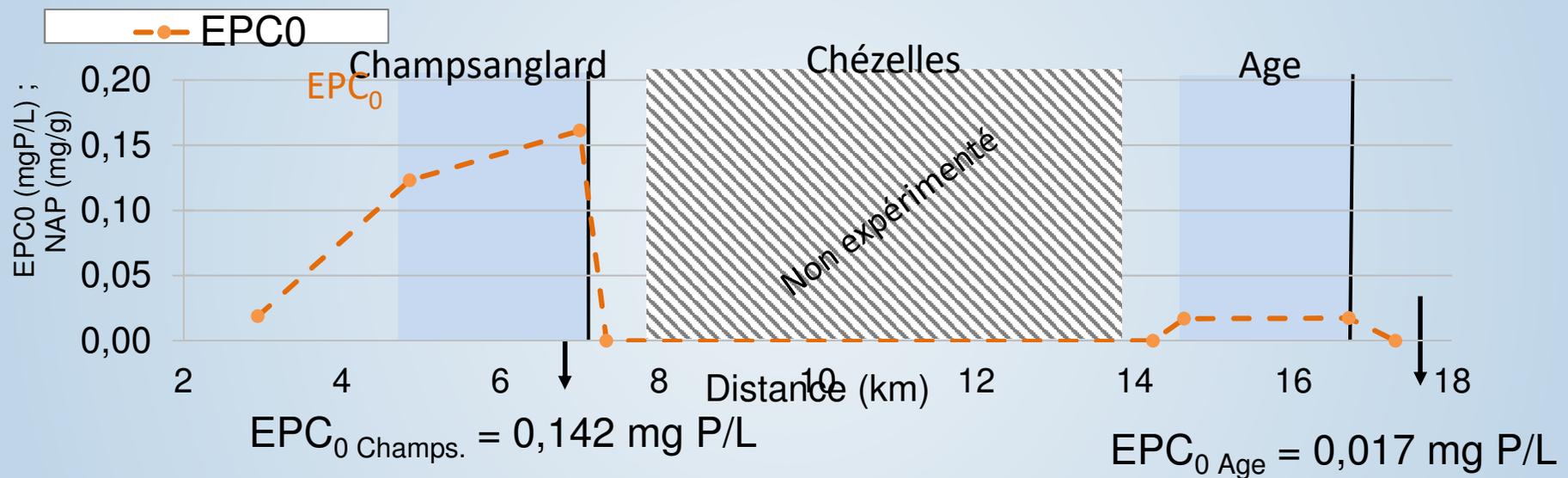
- Etude d'adsorption : isothermes d'adsorption, modèle Langmuir



- **Retenues**
 - Q_m : 0,6 à 1,2 mg P/g_{sec} → capacité de piégeage du P élevée
- **Tronçons fluviaux**
 - $Q_m = 0,07$ mg P/g_{sec} → capacité de piégeage du P faible

Quel est le risque de mobilisation du P sédimentaire vers la colonne d'eau ?

- Etude d'adsorption : isothermes d'adsorption, modèle Langmuir

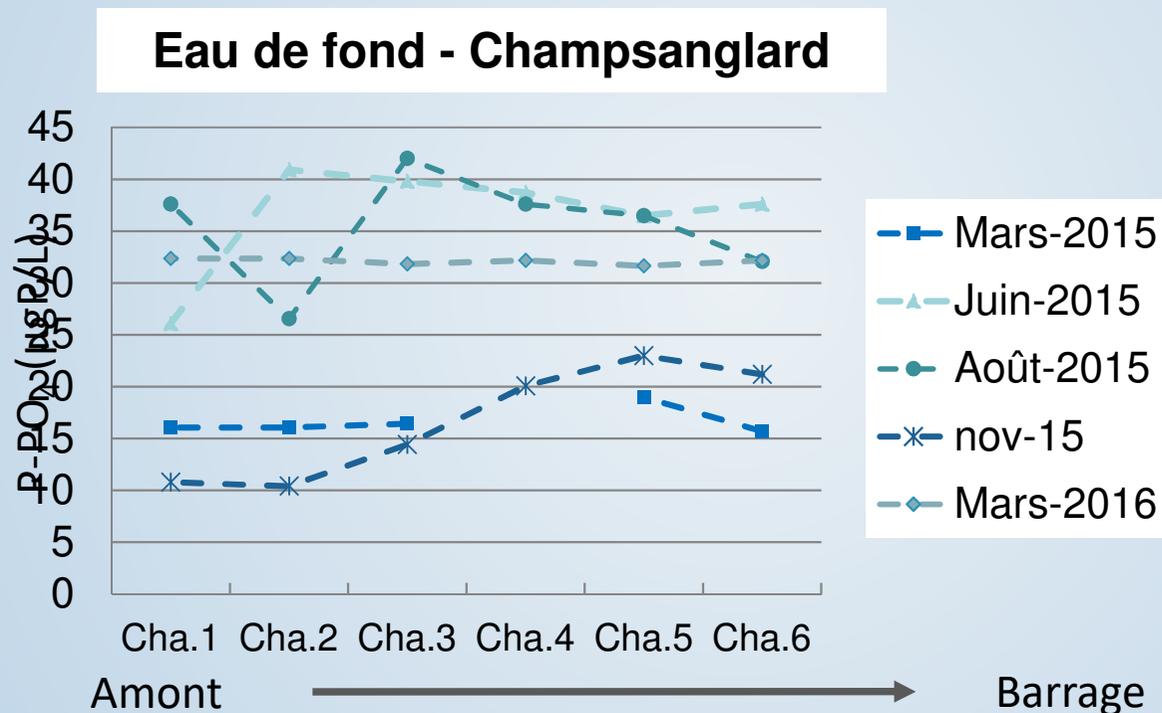


- EPC₀ : [P] dans la colonne d'eau pour laquelle il n'y a ni adsorption ni désorption de P par le sédiment

→ *EPC₀ Champsanglard >> EPC₀ Age*

Quel est le risque de mobilisation du P sédimentaire vers la colonne d'eau ?

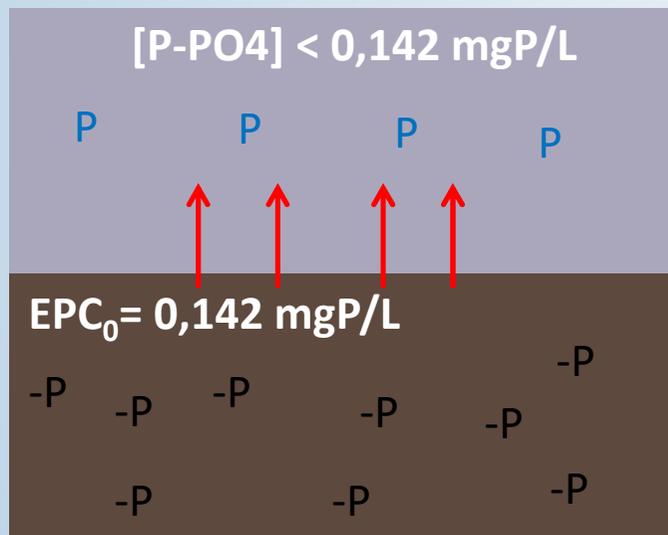
- Suivi des teneurs en PO_4 :
Champsanglard



Pour toutes les mesures, aux différentes saisons $\rightarrow [P-PO_4] \ll 142 \mu\text{g P/L}$

Quel est le risque de mobilisation du P sédimentaire vers la colonne d'eau ?

➤ Etude d'adsorption

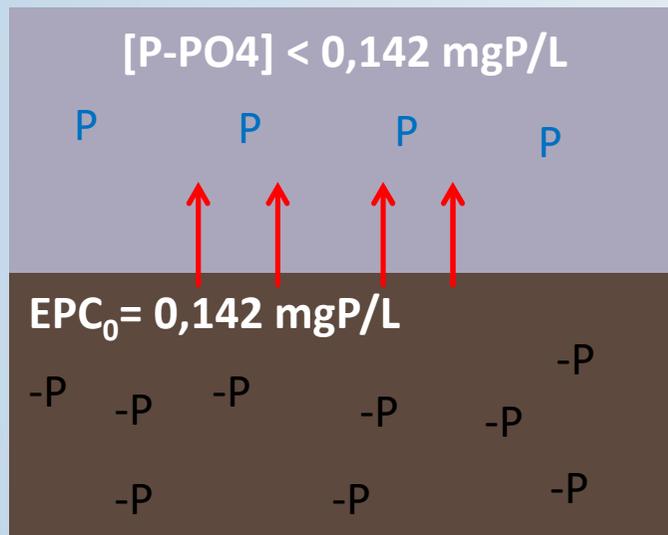


Champsanglard

Sédiment = P source

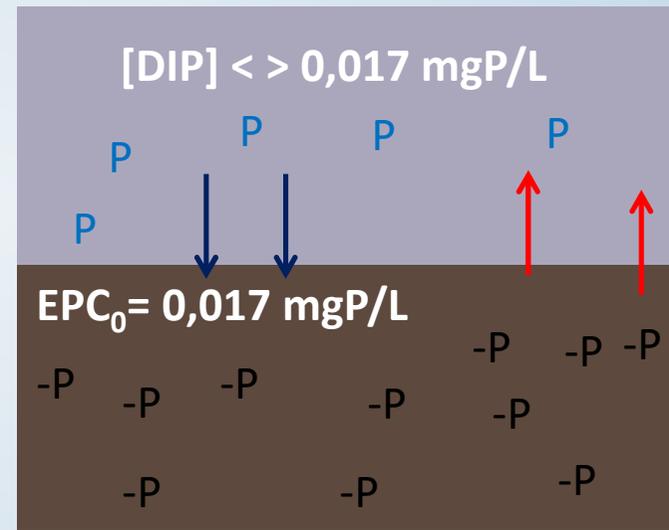
Quel est le risque de mobilisation du P sédimentaire vers la colonne d'eau ?

➤ Etude d'adsorption



Champsanglard

Sédiment = P source



Age

Sédiment = P puits/source

Quel est le risque de mobilisation du P sédimentaire vers la colonne d'eau ?

- **Phosphore potentiellement mobilisable**

31 à 57% du P [0,39 – 1,26 mg P/g_{sec}]

- ✓ **80% du BAP : oxy-hydroxydes Fe, Mn amorphes**

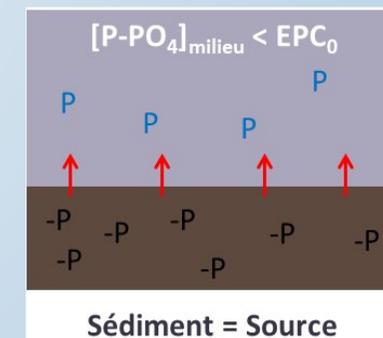
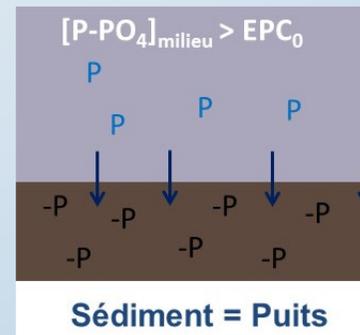
→ Fort potentiel de remobilisation en lien avec la dissolution des oxydes de Fe, Mn en conditions physico-chimiques (milieu réducteur) favorables à la remobilisation du P sédimentaire



- **EPC₀**

- ✓ Champsanglard : rôle permanent du sédiment comme **source** de P vers la colonne d'eau
- ✓ Age : rôle **source et puits**

→ Différence des rôles **puits/source** de P des sédiments le long d'un continuum



3. CONCLUSIONS DISCUSSIONS

Actions à mener pour évaluer la contribution des sédiments dans l'eutrophisation d'une retenue

- **Caractérisation des sédiments**
 - Analyse des teneurs en PT dans les sédiments mais réaliser aussi une étude de son fractionnement → évaluation PPM
→ [Projet POMOSSED \(2019-2021\)](#)
 - Mesure de EPC_0 et des teneurs en P dans les eaux de fond → évaluation des rôles de puits ou source de P des sédiments
- **Toujours maintenir les actions de limitation des flux de P dans les entrants (assainissement, agricole, industriels)**
- **Patience par rapport à l'épuisement de la charge interne**
 - Etudes complémentaires pour évaluer la durée nécessaire
 - Actions de gestion curatives → prudence... !

Problématique des Cyanobactéries

- *Possibilité de bloom même pour des teneurs en P très faibles ($[P] < 15\mu\text{g/L}$)*
- *Techniques curatives → prudence !*
 - Cuivre
 - Biomanipulation
 - Ultra-son (dispositifs mis en œuvre mais non validés scientifiquement)
 - ...

Bibliographie

- Rapin A., Rabiet M., Mourier B., Grybos M., Deluchat V. (2020). Sedimentary phosphorus accumulation and distribution in the continuum of three cascade dams (Creuse River, France). *Environmental Science & Pollution Research* 27, 6526–6539.
- Rapin A., Grybos M., Rabiet M., Mourier B., Deluchat V. (2019). Phosphorus mobility in dam reservoir affected by redox oscillations: An experimental study. *Journal of Environmental Sciences (China)* 77, 250-263.
- 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, 71–76.
- Rapin Anne, 2016, Mobilité du phosphore sédimentaire en contexte de retenues de barrage hydroélectrique, Thèse de l'Université de Limoges
- Pinay, G., C. Gascuel, A. Ménesguen, Y. Souchon, M. Le Moam, A. Levain, C. Ethrillard, F. Moatar, A. Pannard et P. Souchu. 2017. "L'eutrophisation : manifestations, causes, conséquences et prédictibilité." Synthèse de l'Expertise scientifique collective CNRS - Ifremer - INRA - Irstea (France), 148 p.

Bibliographie

- Rapin A., Rabiet M., Mourier B., Grybos M., Deluchat V. (2020). Sedimentary phosphorus accumulation and distribution in the continuum of three cascade dams (Creuse River, France). *Environmental Science & Pollution Research* 27, 6526–6539.
- Rapin A., Grybos M., Rabiet M., Mourier B., Deluchat V. (2019). Phosphorus mobility in dam reservoir affected by redox oscillations: An experimental study. *Journal of Environmental Sciences (China)* 77, 250-263.
- 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, 71–76.
- Rapin Anne, 2016, Mobilité du phosphore sédimentaire en contexte de retenues de barrage hydroélectrique, Thèse de l'Université de Limoges
- Pinay, G., C. Gascuel, A. Ménesguen, Y. Souchon, M. Le Moam, A. Levain, C. Ethrillard, F. Moatar, A. Pannard et P. Souchu. 2017. "L'eutrophisation : manifestations, causes, conséquences et prédictibilité." Synthèse de l'Expertise scientifique collective CNRS - Ifremer - INRA - Irstea (France), 148 p.

<https://fondation.unilim.fr/chaire-grqe/>

Nous contacter :

- stephen.midgley@unilim.fr
- tim.kestens@edf.fr
- veronique.deluchat@unilim.fr