

Eutrophisation, cyanobactéries, phosphore sédimentaire

Véronique Deluchat

CPIE

17EME FORUM RIVIERES

18 NOVEMBRE 2022

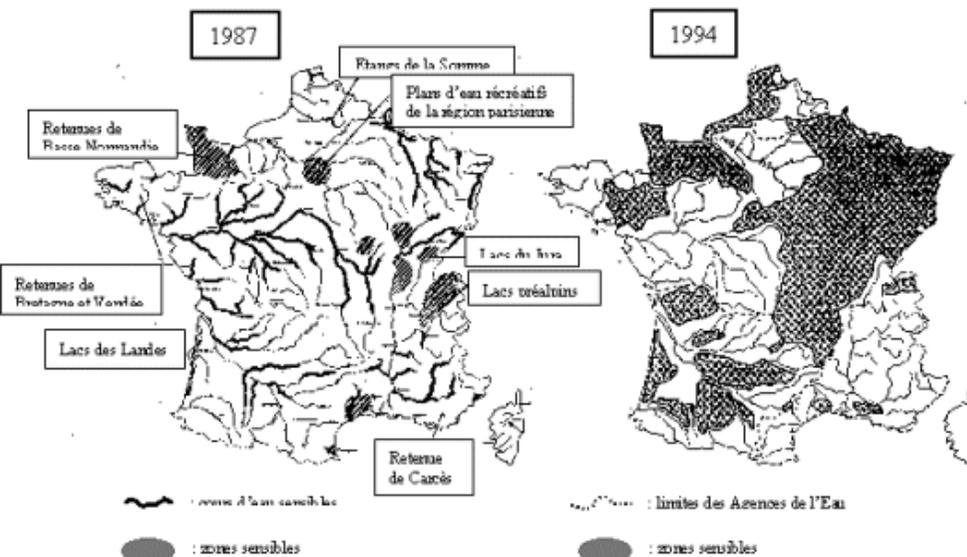


Eutrophisation

Enrichissement de l'eau en éléments nutritifs, notamment des composés de l'azote et/ou du phosphore, provoquant un **développement accéléré des végétaux d'espèces supérieures, des algues et des cyanobactéries**, 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.



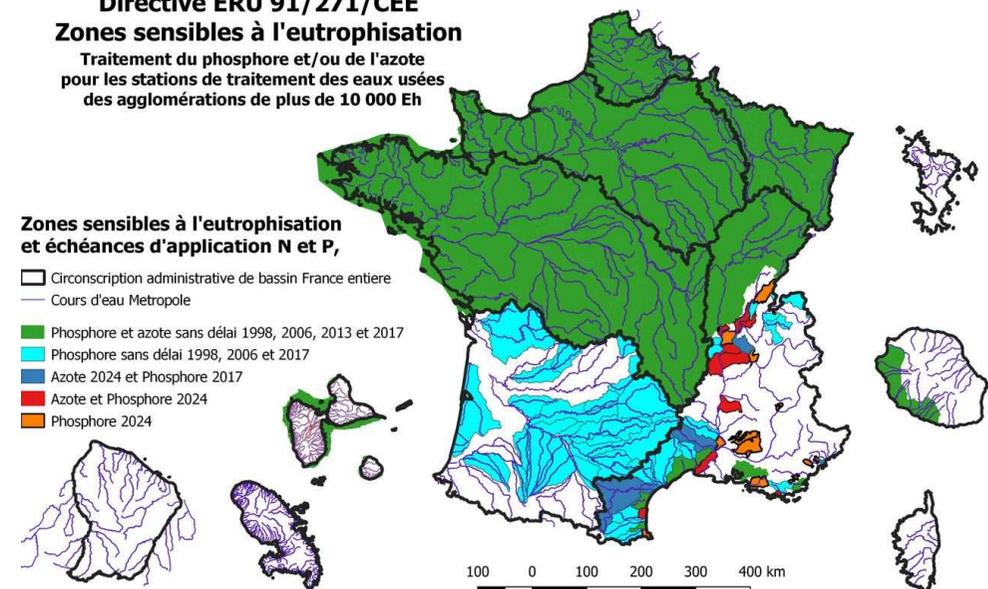
Carte des zones sensibles à l'eutrophisation



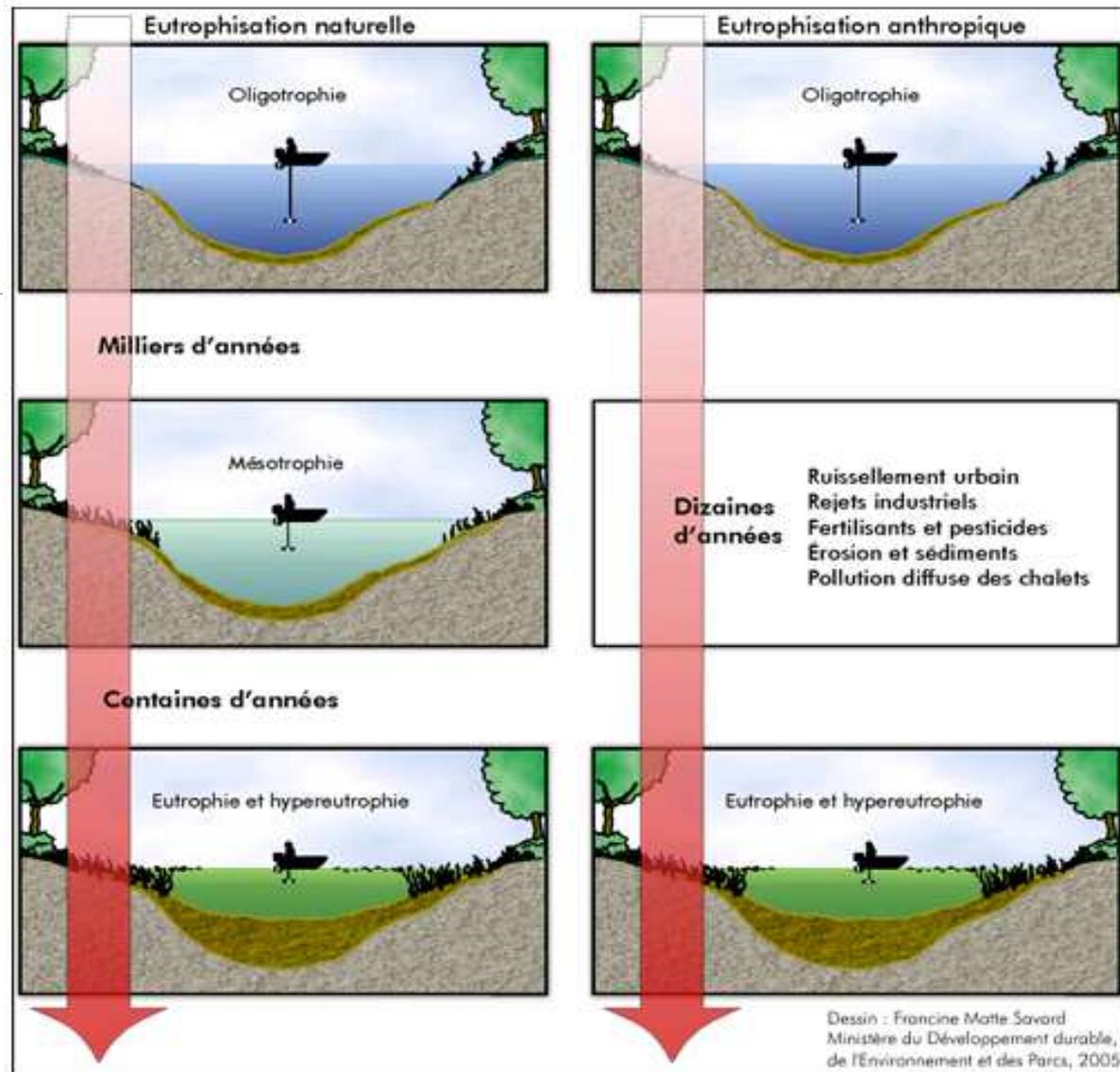
Annexe 4 Les zones sensibles

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



Eutrophisation



Eutrophisation



Macrophytes

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



Microphytes

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

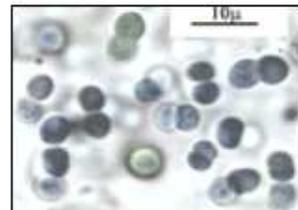


Microcystis sp., *Gomphosphaeria* sp.
Moulin-Pinard (24)

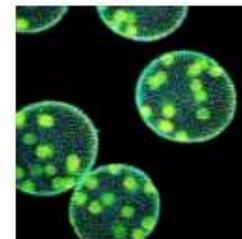
Phytoplankton:

- organismes en suspension
- essentiellement présents dans les couches superficielles

Très diversifié



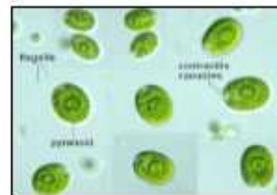
Synechococcus
(Chroococcales)



Volvox
(Volvocales)



Anabaena (nostocales)



Chlamydomonas
(Volvocales)



Cosmarium
(Zygnematales)



Desmodesmus
(Chroococcales)



Cyclotella
(Diatomées)



Rhodomonas
(Cryptophycées)



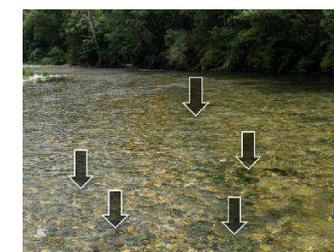
Ceratium
(Dinoflagellés)



Euglena

Cyanobactéries benthiques

- Sur substratum (graviers, galets, blocs...)
- Sur macrophytes immergés



**PROLIFERATIONS DE
CYANOBACTERIES BENTHIQUES
EN RIVIERES**



Catherine QUIBLIER
Equipe Cyanobactéries, Cyanotoxines et
Environnement
Museum National d'Histoire Naturelle, Paris
quiblier@mnhn.fr

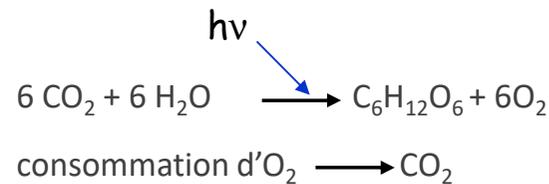
<https://www.eptb-loire.fr/semainederev2019/>

Conséquences de l'eutrophisation

- Décomposition de la biomasse
 - Apport de MO
 - Consommation d'oxygène ⇒ milieu anoxique, réducteur
 - Odeurs (H₂S)
 - H₂S : gaz mortel

- Couverture du système aquatique
 - Transparence nulle : Photosynthèse bloquée ⇒ milieu anoxique

- Activité phytoplanctonique
 - Photosynthèse importante :
 - Période diurne :
 - Période nocturne :

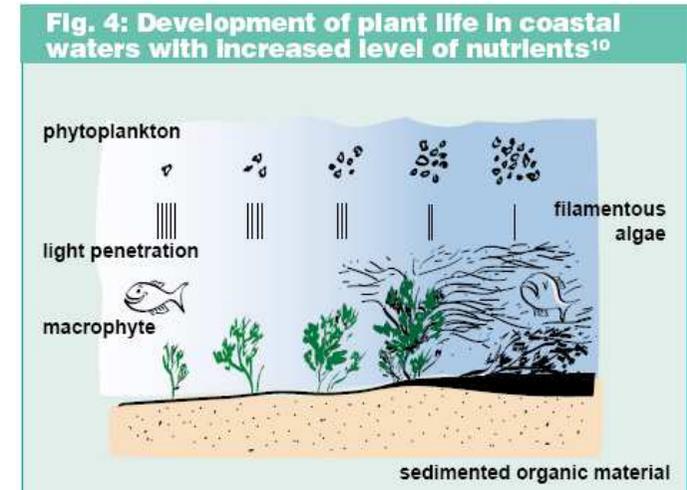


⇒ Jour : milieu avec sur-saturation en oxygène, pH basique
 ⇒ Nuit : milieu anoxique, légère diminution du pH

- ⇒ Vie piscicole perturbée
- ⇒ Anoxie → Relargage nutriments au niveau des sédiments
- ⇒ Hydromorphologie



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



Eutrophisation et santé (2003)

Cyanobactéries

➤ Espèces phytoplanctoniques et benthiques

➤ (= Cyanophycées, cyanophytes, « algues bleues »)

- Microorganismes procaryotes photosynthétiques à Gram négatif, dont la pigmentation peut varier du vert-bleu au rouge
- Longtemps rangées dans le règne végétal car système photosynthétique, proche de celui des eucaryotes
 - il contient la chlorophylle *a* et le photosystème II,
 - il réalise la photosynthèse oxygénique
- Pigments accessoires hydrosolubles : phycocyanine et phycoérythrine
- Règne Eubactéries
 - Structure similaire à celle des bactéries (absence de noyau et d'organites intracellulaires)

Classification : 4 ordres botanique ; 27 Familles ; 166 Genres ; plus de 2000 espèces

➤ Premières cyanobactéries : plus de 3,5 milliards d'années

- Présentes dans la plupart des écosystèmes, même dans des conditions extrêmes
 - Aquatiques ou terrestres (glaciers, sources chaudes, cendres volcaniques...)
 - Grande capacité d'adaptation (température, pH, éclaircissement)
 - Eaux douces ou eaux saumâtres ou milieu marin

Cyanobactéries

➤ Grande variété de formes

- Unicellulaires, solitaires ou en colonie (*Microcystis*)
- Organisées en trichomes (thalle composé d'une série de cellules sans gaine)
- Organisées en filaments (thalle composé d'une série de cellules enveloppées d'une gaine)

➤ Existence de cellules différenciées

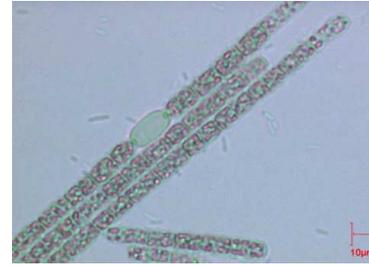
- Hétérocystes : fixation N₂ atmosphérique
- Akinètes : formes de résistance

➤ Contrôle de leur position dans la colonne d'eau

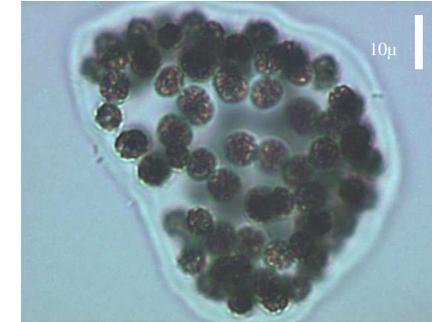
- Vacuoles à gaz
- Utilisation de la lumière
- Synthèse d'hydrates de carbone

➤ Capacité à stocker le P

➤ Synthèse de toxines



Aphanizomenon sp.



Microcystis wesenbergii



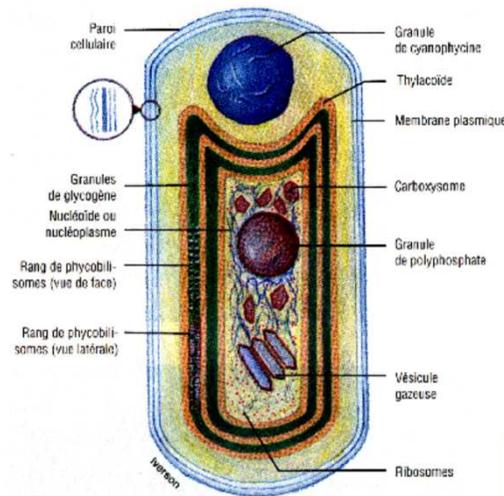
Anabaena circinalis



Planktothrix agardhii



Anabaena flos-aquae



10µ

Cyanobactéries

- Production de molécules malodorantes
 - géosmine, 2-méthylisobornéol
- Production de cyanotoxines
 - Toxines intracellulaires généralement
 - cylindrospermopsine : toxine libérée dans le milieu par les cellules en croissance
 - 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>

Différentes toxines

Cyanotoxines	Principaux genres de cyanobactéries connus pour produire ces toxines	Autres genres de cyanobactéries capables de produire ces toxines
Microcystines	<i>Microcystis</i>	<i>Aphanocapsa, Merismopedia, Radiocystis, Woronichinia</i>
	<i>Planktothrix</i>	<i>Annamia, Geitlerinema, Leptolyngbya, Limnothrix, Kamptonema / Phormidium / Microcoleus, Pseudanabaena, Spirulina, Trichodesmium, Plectonema</i>
	<i>Anabaena</i>	<i>Anabaenopsis, Calothrix, Nostoc, Trichormus</i>
	<i>Hapalosiphon</i>	<i>Fischerella</i>
Anatoxine-a	<i>Anabaena</i>	<i>Aphanizomenon, Cuspidothrix, Cyndrospermum, Dolichospermum, Raphidiopsis/Cyndrospermopsis</i>
	<i>Kamptonema/Phormidium/Microcoleus</i>	<i>Pseudanabaena, Tychonema</i>
Anatoxine-a(S)	<i>Dolichospermum/Anabaena</i>	
Cylindropermopsines	<i>Raphidiopsis/Cyndrospermopsis</i>	<i>Aphanizomenon, Anabaena, Raphidiopsis, Dolichospermum, Chrysosporum</i>
	<i>Umezakia</i>	
	<i>Kamptonema/Phormidium/Microcoleus, Oscillatoria</i>	<i>Lyngbya</i>
Saxitoxines	<i>Aphanizomenon</i>	<i>Anabaena, Dolichospermum, Raphidiopsis/Cyndrospermopsis, Cuspidothrix, Raphidiopsis, Scytonema</i>
	<i>Aphanizomenon</i>	<i>Hydrocoleum, Trichodesmium</i>

Tableau 2. Liste des genres de cyanobactéries potentiellement producteurs des cyanotoxines les plus fréquentes dans les eaux douces (source : Rapport ANSES 2020).

Règlementation eaux destinées à la consommation humaine

- En France :
 - Décret n° 2007- 49 du 11 janvier 2007
 - ✓ Total Microcystine ≤ 1 µg/L
 - ✓ A rechercher en cas de prolifération algale dans les eaux brutes
 - Arrêté du 26 juillet 2002
 - ✓ Informations minimales nécessaires pour évaluer la qualité de l'eau de la ressource
 - ✓ Paramètre microcystine à rechercher dans les eaux superficielles
- OMS : 1 µg/L (MC-LR)
- Canada : 1,5 µg.L⁻¹ (MC total)
- Australie : 1,3 µg.L⁻¹ (équivalents MC-LR)+ recommandations pour STXs, CYN

Différentes toxines

Toxine	Structure moléculaire	Nombre de variants	Sources	Modes de toxicité
Nodularine	Pentapeptide cyclique	6	<i>Nodularia</i>	Hépatotoxique Promoteur de tumeur Inhibiteur de la protéine phosphatase
Microcystine	Heptapeptide Cyclique	> 80	<i>Microcystis</i> <i>Anabaena</i> <i>Nostoc</i> <i>Oscillatoria</i>	Hépatotoxique Promoteur de tumeur Inhibiteur de la protéine phosphatase
Anatoxine-a	Alcaloïde aminé	1	<i>Anabaena</i>	Neurotoxique Inhibiteur neuro musculaire
Anatoxine-a (s), Ester de méthyle Phosphate		1	<i>Anabaena</i>	Neurotoxique Inhibiteur cholinestérase
Saxitoxine	Alcaloïde	6	<i>Aphanizomenon</i>	Neurotoxique Bloc les canaux à sodium
LPS	Lipopoly saccharides	>3	<i>Microcystis</i> <i>Oscillatoria</i>	Choc toxique Gastro-entérite
BMAA	B-N-méthylamine-L-alanine		95% des genres	Neurotoxique Syndromes dégénératifs

Règlementation eaux destinées à la consommation humaine

- En France :
 - Décret n° 2007- 49 du 11 janvier 2007
 - ✓ Total Microcystine $\leq 1 \mu\text{g/L}$
 - ✓ A rechercher en cas de prolifération algale dans les eaux brutes
 - Arrêté du 26 juillet 2002
 - ✓ Informations minimales nécessaires pour évaluer la qualité de l'eau de la ressource
 - ✓ Paramètre microcystine à rechercher dans les eaux superficielles
- OMS : $1 \mu\text{g/L}$ (MC-LR)
- Canada : $1,5 \mu\text{g.L}^{-1}$ (MC total)
- Australie : $1,3 \mu\text{g.L}^{-1}$ (équivalents MC-LR)+ recommandations pour STXs, CYN

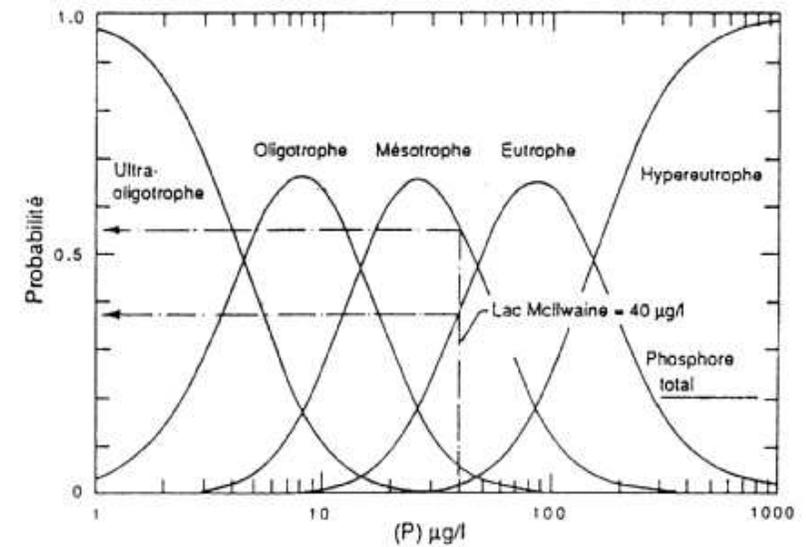
Causes de l'eutrophisation

Azote et Phosphore

- Milieu eaux douces : P facteur limitant
- Milieu marin : N facteur limitant

Autres facteurs influençant le développement du phytoplancton et des végétaux

- Temps de résidence
- Hydrodynamique
- Lumière
- Température
- Silice
- Salinité



Rapport OCDE, 1982

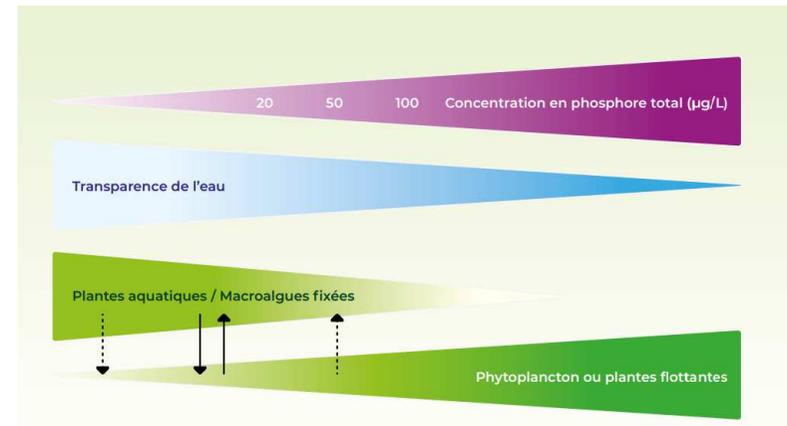


Figure 1. Conséquences de l'augmentation des concentrations en phosphore dans les écosystèmes aquatiques continentaux sur la transparence de l'eau et sur la structure des communautés de producteurs primaires. Les flèches sur la figure indiquent les changements d'état écologique possibles

Humbert et Quiblier, 2022

USAGES DES MASSES D'EAU → Problème de compatibilité

✓ **Alimentation en eau potable, Baignade, Activités nautiques**

- Faible teneur en MES, transparence importante → Faible densité phytoplanctonique
- Faible teneur en matière organique
- Faible nombre de cyanobactéries
- Milieu pauvre en nutriments et particulièrement en phosphore

Conditions défavorables à une vie piscicole importante, et au développement d'espèces animales associées

✓ **Pêche**

- Abondance de nourriture pour les poissons → Densité phytoplanctonique importante
- Milieu riche en nutriments

Conditions défavorables aux activités de baignade et production d'eau potable

Techniques curatives

- Algicide (Cu)
- Piégeage de P (sels d'Al, La)
- Sonication
- Bioadditifs
- Fertilisants
- Paille d'orge ...

La recherche de solutions miracles...

- Des solutions dont l'efficacité est généralement limitée... quand elle est évaluée !!!

Le système d'ultrasons renouvelé contre les algues bleues à Jouillat

Lundi 8 juillet 2019 à 6:06 - Par Morgane Heuzin-Roffart, France Bleu Creuse, France Bleu

Le système d'ultrasons expérimenté à l'été 2018 est reconduit cette année dans La Creuse pour lutter contre les algues bleues. Le Grand Guéret fera le bilan de son efficacité l'an prochain, mais il a déjà montré son efficacité à condition que le nombre de cyanobactéries n'explose pas.

semé saint dans

D. Actions de luttes et perspectives

2. Les échecs passés et les pistes de réflexion

- Les échecs:
 - L'artificialisation générale du site
 - Beaucoup de traitements de l'eau (produits à base de bactéries, algicides, insecticides, etc.)
 - Curage des sédiments
 - Le paillage et les aérateurs
 - Dérèglement profond de l'écosystème aquatique naturel traduit par un état eutrophe voire hyper-eutrophe
- Les pistes de réflexions:
 - Limiter les intrants dans le plan d'eau:** suppression des exutoires d'eaux pluviales et de la digue de nuisance, réparation de la pompe à eaux usées, mise en place de bandes enherbées au niveau des berges
 - Ingénierie écologique et actions de restauration:** suppression des pontons et des grillages limitant l'expansion des hélophytes, mise en place de radeaux flottants végétalisés, capture par pêche électrique des espèces piscivores carnassières et fousisouses
 - Restauration du plan d'eau:** reprise des berges, la création de nouvelles roselières et d'herbiers aquatiques

Creseb
Bretagne
Observatoire de Rennes
Université de Rennes

Cyanobactéries :
Recensement et analyse des suivis et des actions conduites dans les plans d'eau en Bretagne et mise en perspective pour l'action



Diane OLIVIER
Mast'2 Gestion des Habitats et des Bessins Versants

JF Humbert <https://www.eptb-loire.fr/semainederev2019/>

→ à considérer avec beaucoup de précaution!

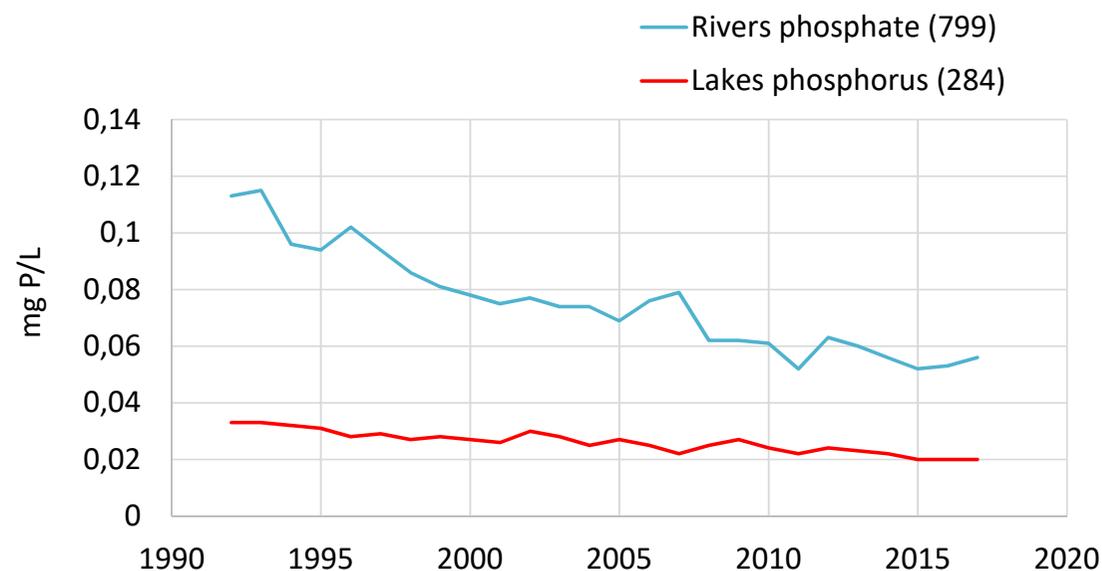
Techniques préventives

- Limitation des teneurs en nutriments dans les milieux aquatiques
 - Interdiction des phosphates dans les détergents
 - Traitement des eaux usées
 - Pratiques agricoles



- ✓ Diminution des teneurs en P dans les rivières
- ✓ Diminution moindre dans les retenues

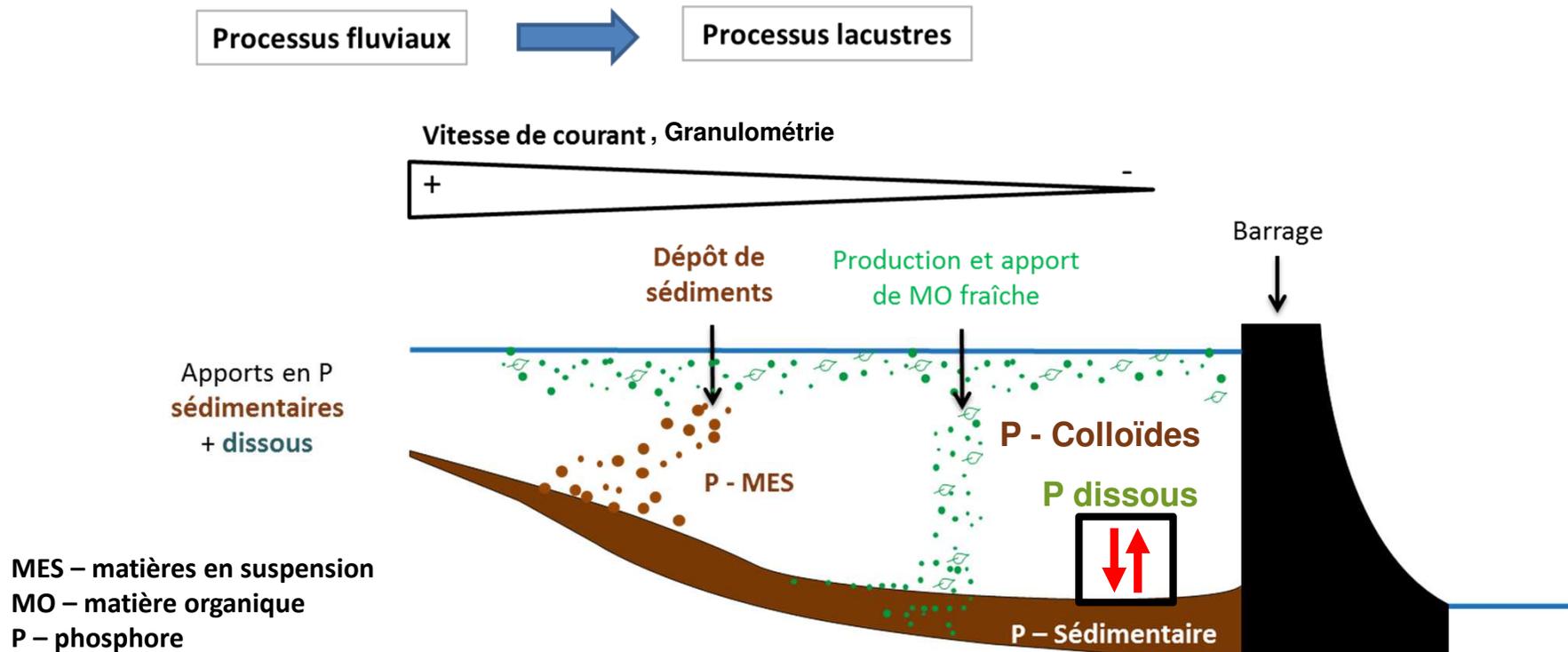
- ✓ Charge interne de P sédimentaire



European Environment Agency (EEA) 2018

Eutrophisation : charge interne en P dans les retenues

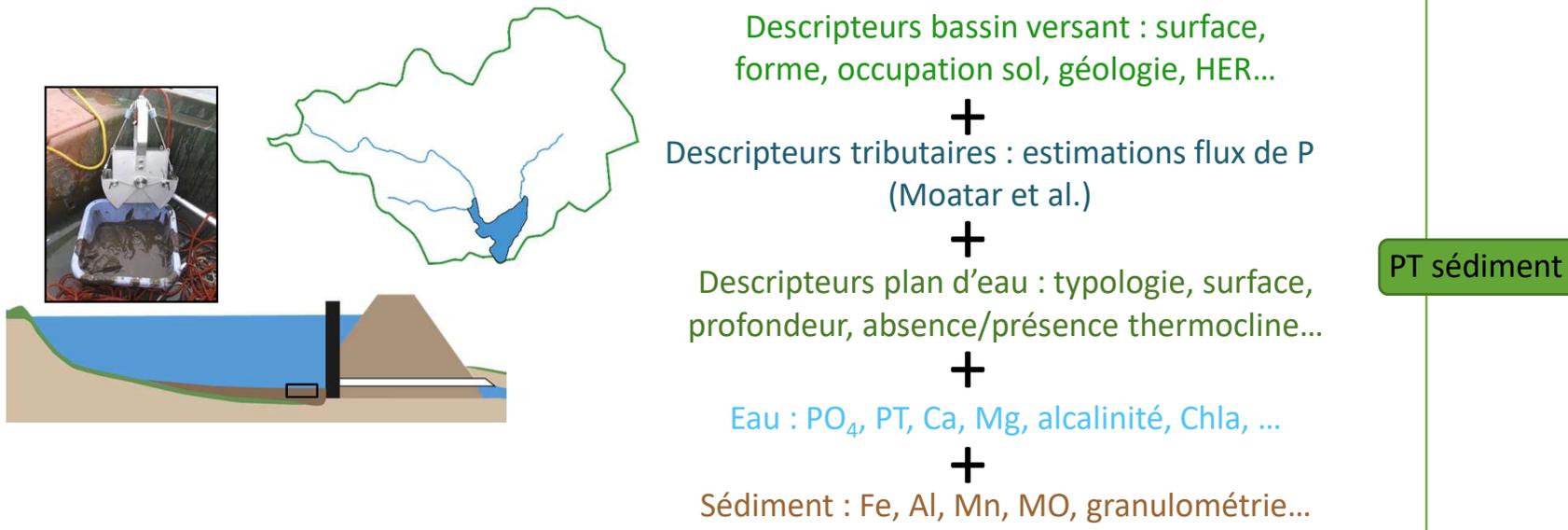
- 12% de la charge globale en P des rivières stockés dans les retenues de barrage (Maavara *et al.*, 2015)
- Charge interne en P sédimentaire potentiellement remobilisable vers la colonne d'eau
 - Maintien du processus d'eutrophisation (Peng *et al.*, 2013; Nikolai & Dzialowski 2014)
 - Temps de réponse des milieux à la restauration des eaux de surface



Projet POMOSED (2019-2021)

Volet 1 : Exploitation de la base de données Naiades (2005-2018)

Est-il possible de corréliser les teneurs en **phosphore total (PT) sédimentaire** à des caractéristiques intrinsèques du sédiment, au fonctionnement du plan d'eau et/ou des descripteurs externes pertinents ?



→ **Analyses statistiques des données physico-chimiques** (corrélation, ACP) : identifier si possible les **variables/facteurs explicatifs** des teneurs en PT dans le sédiment et leur **signature anthropique**

Projet POMOSED (2019-2021)

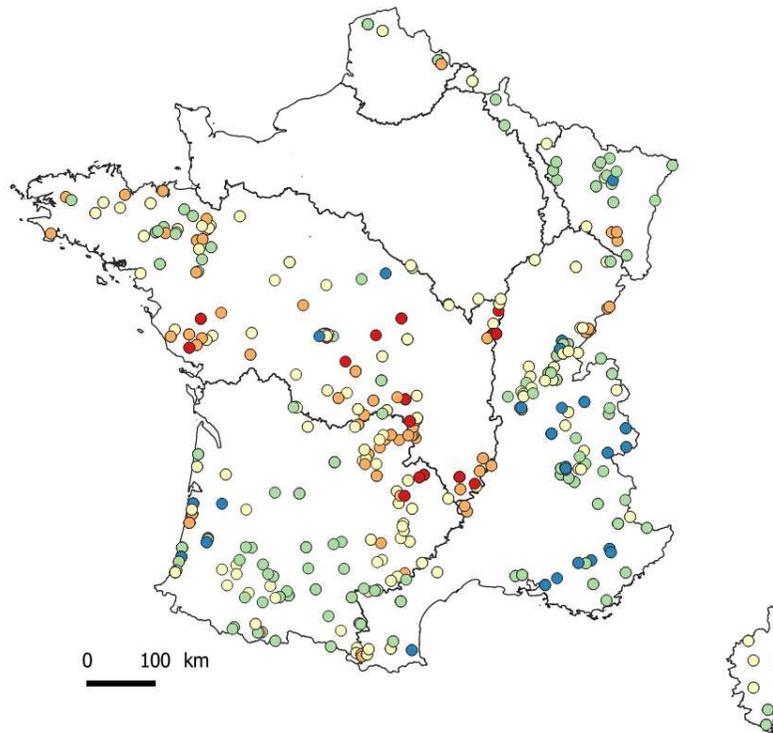
Volet 1 : Exploitation de la base de données Naiades (2005-2018)

→ 558 individus correspondant à 252 stations (jeu de données complet)

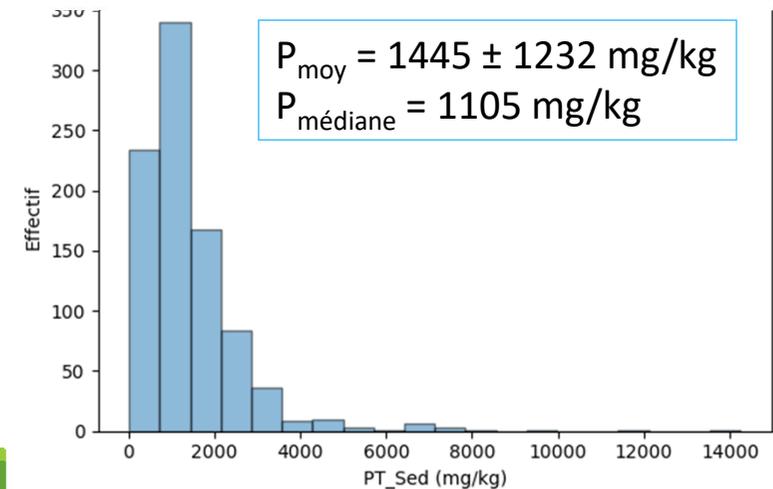
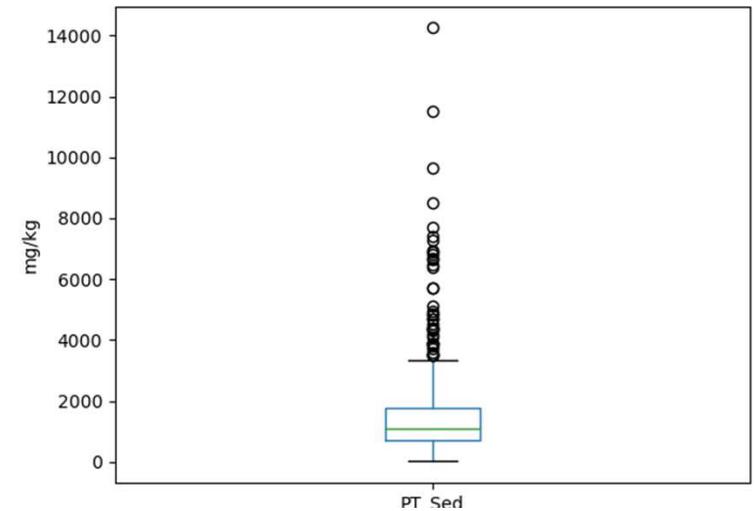
Analyse de données

PT Sed

- 0 - 500
- 500 - 1000
- 1000 - 2000
- 2000 - 3000
- 3000 - 14250



Grande variabilité des concentrations



Projet POMOSED (2021)

Volet 1 : Exploitation de la base de données Naiades (2005-2018)

Paramètres considérés pour les analyses statistiques :

Paramètres des sédiments

PT sed - Al sed - Fe sed - Mn sed - CO sed - Granulométrie

Paramètres des plans d'eau (PE)

Hydroécorégions – Géologie - Type de plans d'eau - Saturation en oxygène dissous dans la colonne d'eau - Niveau d'anthropisation du bassin versant (Ranthropo) - Forme de la cuvette du plan d'eau - Indice de forme (IF)

$$R_{anthropo} = \frac{\text{surface du BV anthropique (agricole et urbaine)}}{\text{surface du plan d'eau}}$$

$$IF = p / (2\sqrt{(\pi A)}) \text{ (p: périmètre du PE et A : surface du PE)}$$

Outils statistiques :

Tableau de corrélation (Spearman) ; Analyse en Composante Principale (ACP), Anova, Test de Tuckey, Boîtes à moustache

Projet POMOSSED (2019-2021)

Volet 1 : Exploitation de la base de données Naiades (2005-2018)

Proposition de « grilles de qualification » :

Distinction des contextes géologiques :

Analyse par quartiles des données disponibles

socle

et

sédimentaire

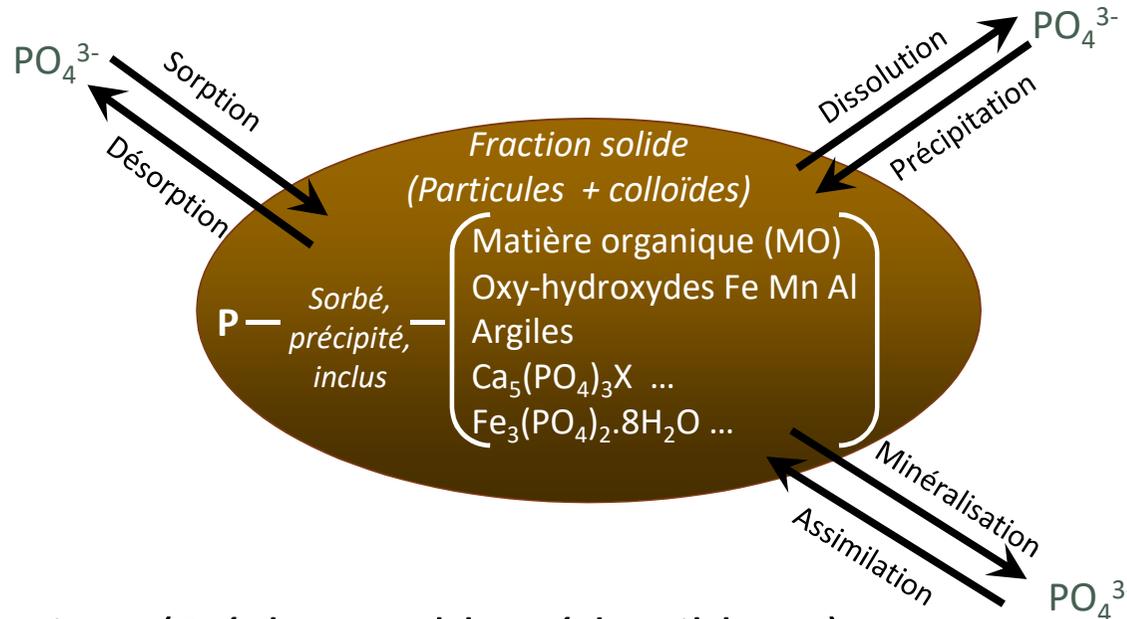
Ranthropo	<20	>20
Moyenne	1,3	1,9
Q1	0,8	1,3
Q2	1,3	1,8
Q3	1,6	2,4
Q4	3,8	4,1

Ranthropo	<20	>20
Moyenne	0,9	1,2
Q1	0,5	0,7
Q2	0,7	0,9
Q3	1,1	1,5
Q4	4,4	3,2

PT (mg P/g séd. Sec)	Non enrichis	Peu enrichis	Assez Enrichis	Enrichis	Très enrichis
Socle	< 0,8	0,8 - 1,3	1,3 - 1,6	1,6 - 2,4	> 2,4
Sédimentaire	< 0,5	0,5 - 0,8	0,8 - 1,1	1,1 - 1,5	> 1,5
	< 20 ; < Q1	< 20 ; < Q2	< 20 ; < Q3	> 20 ; < Q3	> 20 ; > Q3

Projet POMOSED (2019-2021)

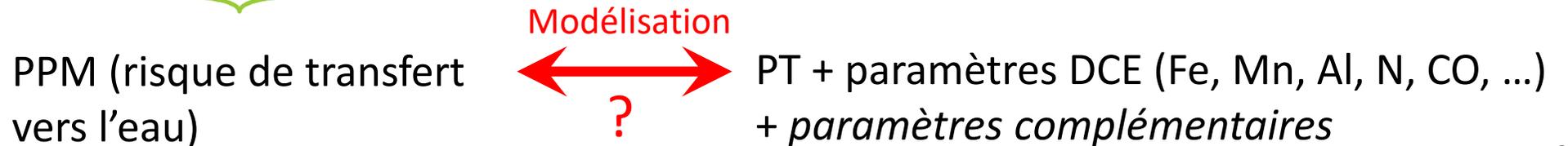
Volet 2 : Evaluation du risque de transfert : estimation du P potentiellement mobilisable (PPM)



- Protocoles opérationnels d'extractions chimiques :
- P échangeable
 - P réductible
 - P oxydable
 - P résiduel

$$PT = \sum \text{fractions (P échangeable, réductible, ...)}$$

$$= \underbrace{P \text{ Potentiellement Mobilisable}} + P \text{ immobile}$$



Projet POMOSED (2019-2021)

Volet 2 : Evaluation du risque de transfert : estimation du P potentiellement mobilisable (PPM)

En moyenne sur les 37 plans d'eau :

1) P-Ascorbate → phases facilement réductibles (Fe) : 40 ± 20 %

2) P-NaOH → phases oxydables (MO) : 18 ± 10 %

3) P-résiduel → phases réfractaires : 15 ± 15 %

4) P-HCl → phases carbonatées + autres phases minérales: 9 ± 9 %

5) P-MgCl₂ → échangeable : 1 ± 1 %

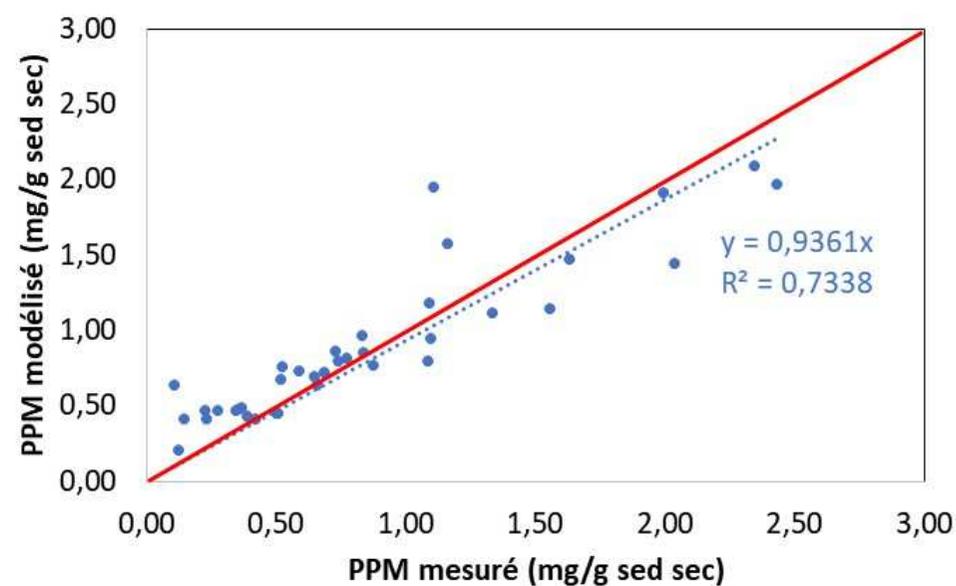
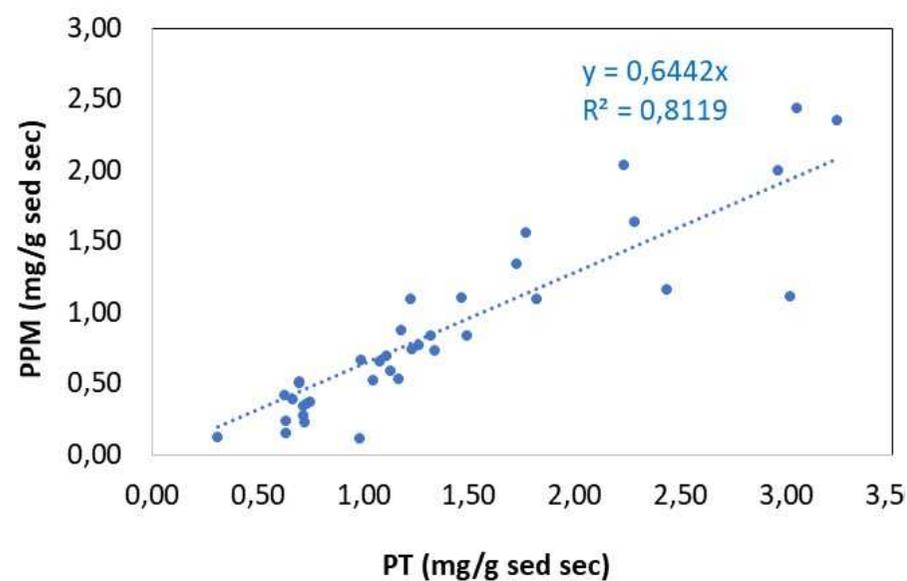
Mobile en condition anoxique, lié à la dissolution des phases porteuses du P

Mobile lors de la dégradation/libération de matière organique

Projet POMOSED (2021)

Volet 2 : Evaluation du risque de transfert : estimation du P potentiellement mobilisable (PPM)

Modélisation :

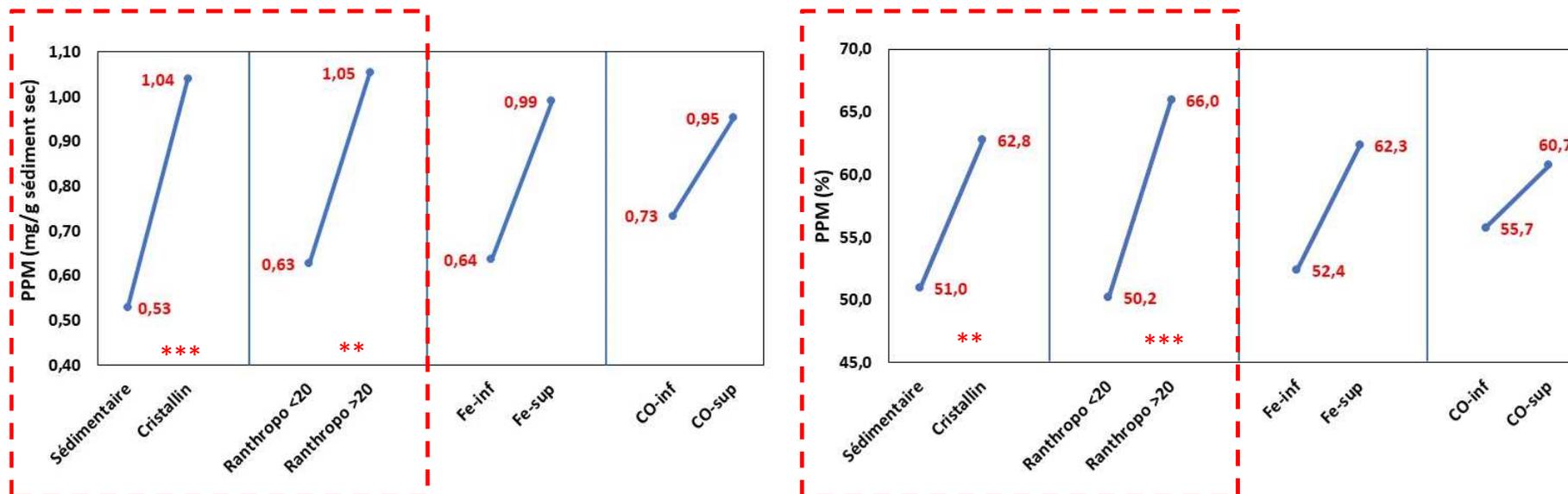


Bonne estimation du PPM avec PT : $PPM = 0,6442 \times PT$

Projet POMOSED (2021)

Volet 2 : Evaluation du risque de transfert : estimation du P potentiellement mobilisable (PPM)

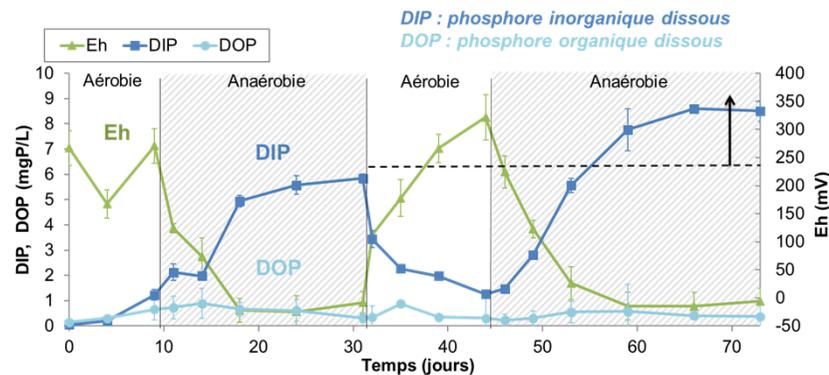
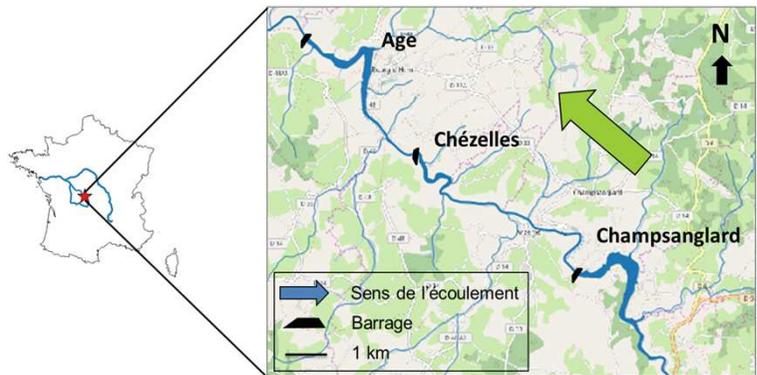
Effet moyen des facteurs sur PPM :



*** p -value < 0,01 ; ** p -value < 0,05).

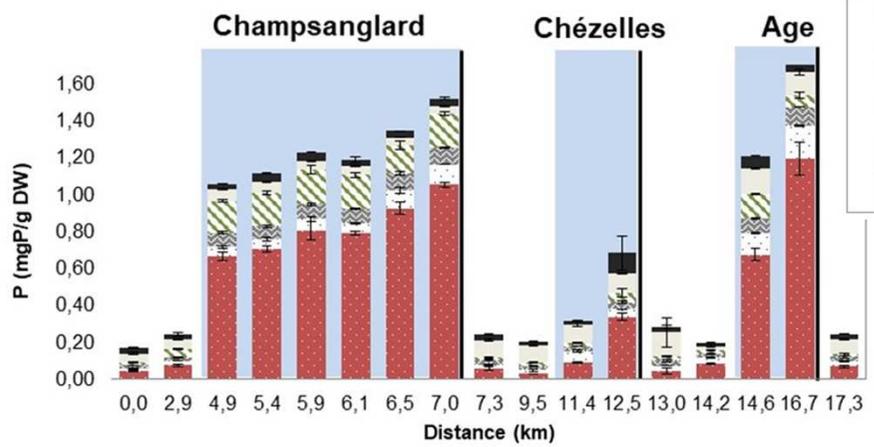
Variabilité observée sur le PPM (en teneur et en pourcentage) expliquée par **Ranthropo et géologie**
→ enrichissement des sédiments en P en particulier associé à des phases porteuses mobiles :
contexte cristallin associé à une pression agricole importante

Etudes de la mobilité du phosphore sédimentaire en contexte de barrage

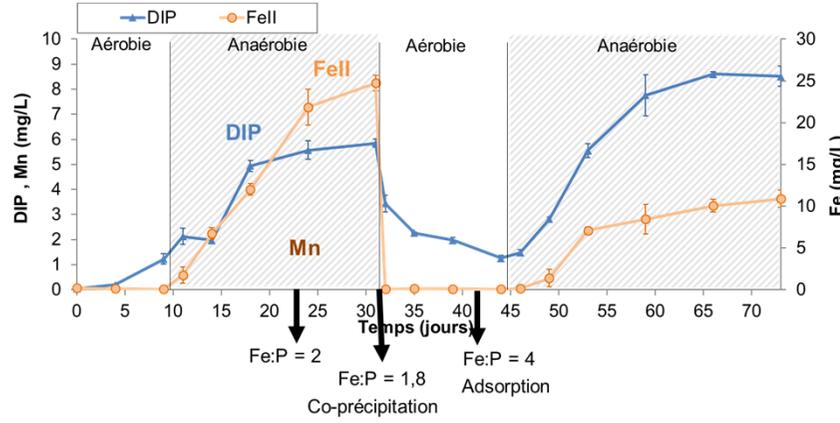


Thèse Anne Rapin (2017)

Quelles sont les phases porteuses du P sédimentaire le long d'un continuum de barrage ?



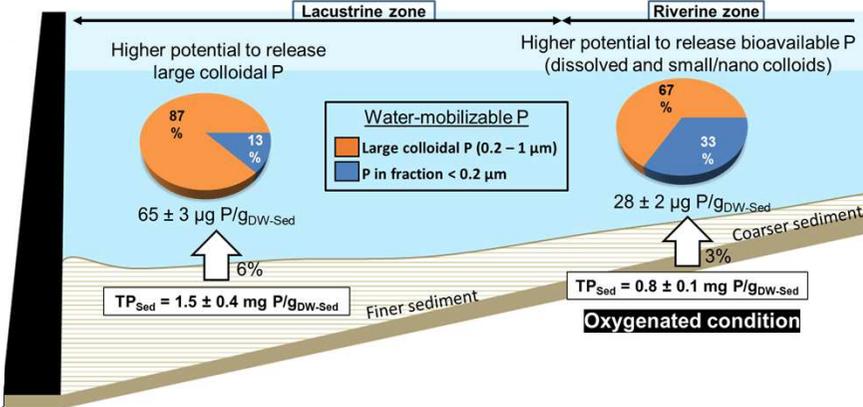
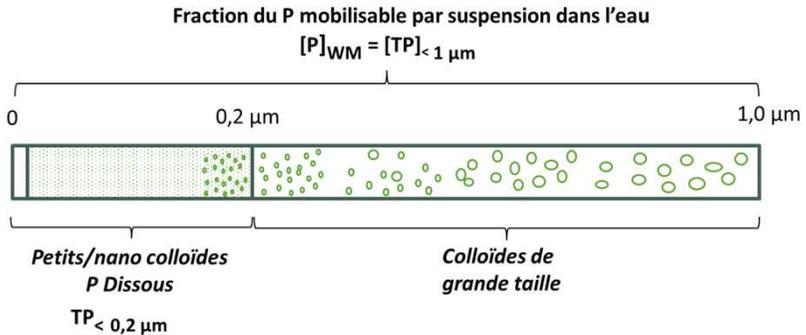
- P-Res → Fraction réfractaire
- P-HCl → Fraction sensible au pH (ex: Ca)
- nrP-NaOH → Fraction oxydable
- rP-NaOH → Al
- P-DB → Fraction difficilement réductrice
- P-Asc → Fraction facilement réductrice
- P-MgCl2 → Fraction échangeable



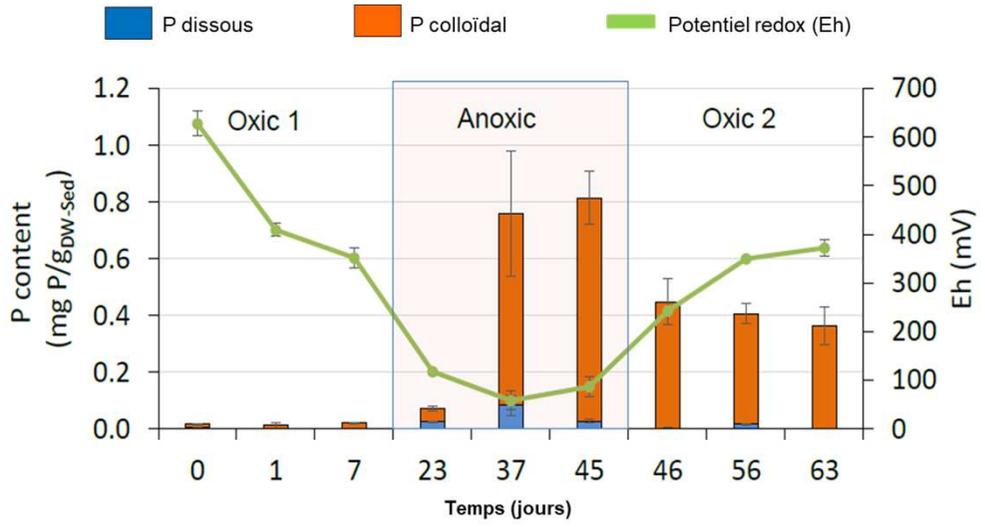
- Principale fraction : P facilement réductible
- Maintien de la mobilisation du P même quand retour à des conditions oxygènes
- Rôle du Fe et de la MO dans la mobilisation du P en condition anoxiques

Etude de la contribution de la fraction colloïdale dans la mobilité du P sédimentaire dans les retenues

Thèse Diep Nguyen (2020)



Impact de variations des conditions rédox sur la mobilité de P?

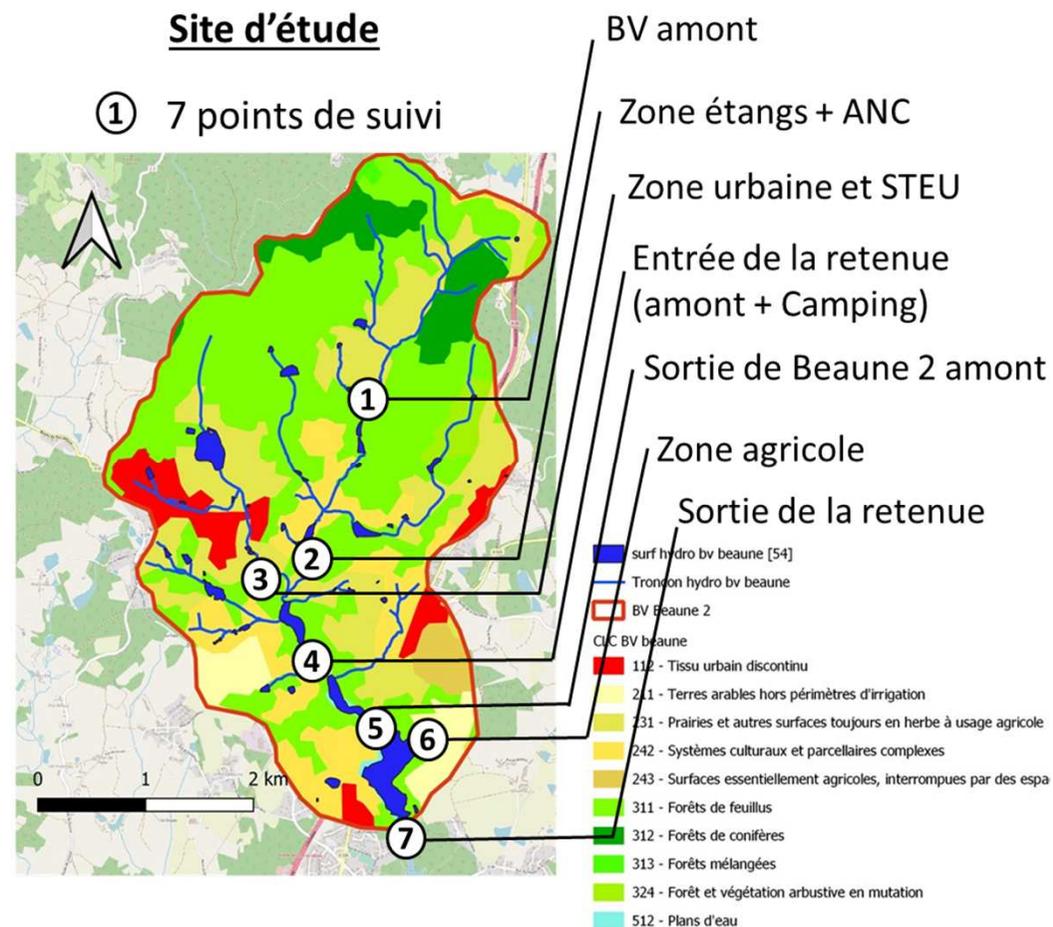
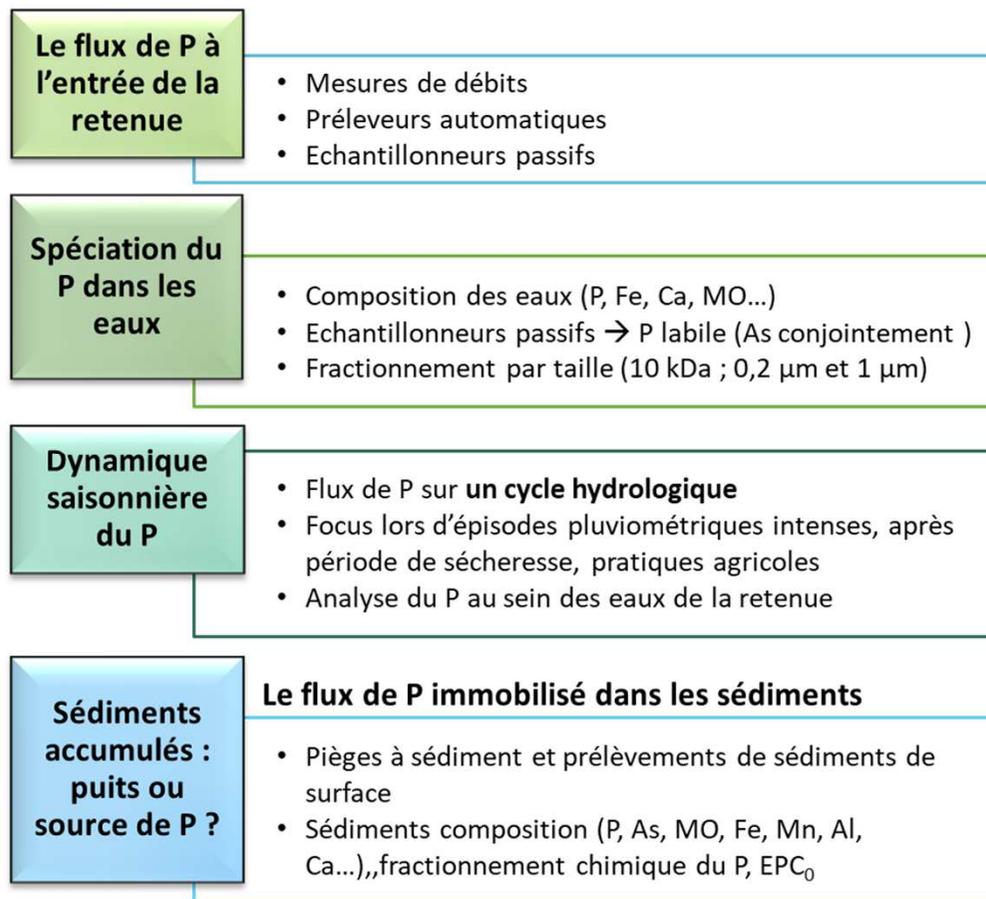


→ Contribution des colloïdes de 0,2 à 1 µm

- Mobilisation importante de P en conditions anoxiques, principalement sous forme colloïdale
- Fraction colloïdale : phase porteuse d'importance dans le cycle du P

Travaux en cours : Projet Pho-Ret

Dynamique du phosphore dans les retenues : du bassin versant à la retenue, des sédiments vers la colonne d'eau → Application à la retenue de Beaune 2



Merci de votre attention



Bibliographie

- Humbert J-F, Quiblier C. Les écosystèmes d'eau douce - Eutrophisation et cyanobactéries. Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM); Agence Française de Développement (AFD); Sorbonne Université; Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN), 2022.
- Projet POMOSSED – Phosphore mobilisable dans les sédiments de plans d'eau : Quels paramètres pertinents pour l'évaluation des stocks ? – Rapport de synthèse 2022, Véronique Deluchat, Marion Rabiet, Claire Lix, Malgorzata Grybos, Anne Blondeau Da Silva, Louise Gautier, Hind Hajji, Francois Louvet, Patrice Fondanèche, Karine Cleries, Emmanuelle Ducloux, Laboratoire E2Lim ; Pierre-Alain Danis, Eva Thierry, Jean-Marc Baudoin, Office Français de la Biodiversité
- Nguyen D., 2020, Etude de la contribution de la fraction colloïdale dans la mobilité du P sédimentaire dans les retenues, Doctorat, Université de Limoges
- Rapin A., 2017, Mobilité du phosphore sédimentaire en contexte de retenues de barrage hydroélectrique, Doctorat, Université de Limoges
- Évaluation des risques liés aux cyanobactéries et leurs toxines dans les eaux douces- Rapport ANSES Mai 2020

<https://www.anses.fr/en/system/files/EAUX2016SA0165Ra.pdf>

- Gilles Pinay, Chantal Gascuel, Alain Ménesguen, Yves Souchon, Morgane Le Moal (coord), Alix Levain, Claire Etrillard, Florentina Moatar, Alexandrine Pannard, Philippe Souchu. L'eutrophisation : manifestations, causes, conséquences et prédictibilité. Synthèse de l'Expertise scientifique collective CNRS - Ifremer - INRA - Irstea (France), 148 pages.

<https://eutrophisation.sciencesconf.org/> Colloque eutrophisation – ESCo – 19 septembre 2017

- https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/recommandations-pour-qualite-eau-potable-canada-document-technique-toxines-cyanobacteriennes-document.html#2_4_Consid%C3%A9rations_internationales