

Fiche projet Accord Cadre ZABR – Agence de l’eau

2025-BIOTRACE RHONE-ASNR-Changement climatique et pompage biologique des contaminants

INTITULE DU PROJET : AC ZABR – Act°102-Changement climatique et pompage biologiques des contaminants
(BIOTRACE Rhône – ASNR – CEREGE CNRS – AMU IMBE)

Responsable scientifique du projet :

- Nom : EYROLLE
- Prénom : Frédérique
- Organisme du contact : ASNR
- Fonction : Chercheur
- Courriel : frederique.eyrolle@asnr.fr
- Téléphone : 04 42 19 95 12

Référent (s) administratif(s) :

- Nom : Sauzeat
- Prénom : Alexis
- Organisme du contact : ASNR
- Fonction : Service comptable
- Courriel : alexis.sauzeat@asnr.fr
- Téléphone : 01 58 35 71 42

EQUIPES DE RECHERCHES ZABR CONCERNEES et CONTACT SCIENTIFIQUE DE L'EQUIPE

(Équipe membre ou associée de la ZABR)

ASNR PSE-ENV/STAAR/LRTA – Frédérique Eyrolle

CNRS CEREGE – Jérôme Labille

Aix-Marseille Université – IMBE, UMR 7263 – Stéphanie Fayolle-Sanna

AUTRES PARTENAIRES

(Préciser leur degré d'implication et leur accord)

- Recherche :
- Institutionnel :

THEMATIQUE NATURE ET OPERATION (ne rien compléter)

- Thématique : Etude recherche et réseau de suivi
- Nature du projet : Etude générale et recherche
- Type d'opération : Recherche et innovation
- Intitulé de l'opération :

LOCALISATION DU PROJET : (se remplit automatiquement -Ne rien remplir)

- Commune principale et numéro INSEE : à compléter
- Sous bassin versant
- Nom du cours d'eau
- Contrat (si intégré dans un contrat de rivière, un SAGE ou un autre contrat avec l'agence de l'eau)

RESUME DU PROJET GLOBAL

- **Résumé : 3000 caractères espaces inclus**

La majorité des cours d'eau et fleuves de France métropolitaine connaissent une diminution de leurs débits moyens annuels et une augmentation de la température de l'eau. La fréquence des événements de sécheresse hydrologique et de températures élevées de l'eau augmente également. La production de phytoplancton, influencée par plusieurs paramètres, est favorisée par l'augmentation de la température de l'eau et de l'ensoleillement. Le phytoplancton, dont la taille peut varier de moins d'un micromètre à plusieurs dizaines, constitue des matières en suspension autochtones ou biogènes, contrairement aux matières allochtones ou détritiques issues de l'érosion des sols. Bien que la contribution des matières autochtones aux flux solides soit minoritaire comparée aux flux détritiques, elles constituent une voie majeure d'entrée dans la chaîne trophique et jouent un rôle clé dans la fixation des contaminants, par adsorption ou bioaccumulation, en particulier en période de bas débits, lorsque très peu de matériel détritique circule. La distribution des contaminants dans ces conditions hydrologiques reste peu connue. Pourtant, elle impacte directement la qualité de la ressource en eau et le transfert des contaminants vers la chaîne trophique, car le matériel autochtone est particulièrement labile et facilement consommé. Des mécanismes de pompage biologique des contaminants par les particules autochtones ont été observés dans les zones estuariennes et certains lacs, mais ces processus sont encore peu étudiés en rivière. Le projet **BIOTRACE RHONE** vise à constituer un jeu de données in-situ permettant de quantifier ces processus dans le Rhône et certains de ses affluents. L'objectif est d'évaluer l'impact de ces processus sur la qualité de la ressource en eau et de calibrer des modèles permettant de projeter leur évolution dans des scénarios de changement climatique et de sécheresses accrues pouvant affecter certains bassins versants du Rhône. L'approche méthodologique consiste à identifier les paramètres physico-chimiques et biochimiques influençant la production de phytoplancton (température, turbidité, oxygène dissous, teneurs en nutriments, etc.), et à évaluer la distribution des contaminants (métaux traces) entre l'eau et les matières en suspension. Des enregistrements à haute fréquence des paramètres physico-chimiques de l'eau et des concentrations en pigments chlorophylliens (proxy des particules phytoplanctoniques) seront réalisés à l'aide de sondes autonomes dans le Rhône et la Durance pendant une année hydrologique. Ces mesures seront complétées par des échantillonnages d'eau (préleveurs automatiques) pour analyser les concentrations de nutriments, de métaux dissous et particulaires et identifier les espèces phytoplanctoniques. Les jeux de données ainsi obtenus seront exploités par des analyses statistiques et alimenteront des modèles basés sur l'Intelligence Artificielle, afin d'identifier les liens de cause à effet entre les différents paramètres mesurés.

BIOTRACE RHONE-2025-04-ASNR-EQUIPE 1 (Responsable Eyrolle Frédérique ; membres de l'équipe : Patrick Boyer, Valérie Nicoulaud Gouin, Kathleen Pele, David Mourier et Franck Giner) (500 caractères espaces inclus)

- Tache de l'équipe dans le projet

L'ASNR sera chargé de l'instrumentation des sites ateliers sélectionnés, le Rhône à SORA et la Durance au niveau de Bonpas et de sa maintenance (instrumentations in situ par sondes et capteurs, préleveurs automatiques d'eau), de la collecte et gestion des échantillons d'eau en collaboration avec l'équipe 2, des analyses de nutriments et du développement des outils basés sur l'intelligence artificielle.

BIOTRACE RHONE-2025-04-CEREGE-EQUIPE 2 (Responsable Labille Jérôme, membre équipe : CDD AI)

- Le Cerege interviendra en binôme avec l'ASNR sur le terrain deux fois par mois sur la Durance et le Rhône, pour déployer l'hydro collecteur et récupérer les échantillons d'eau brute. Il aura aussi la charge de la préparation des échantillons d'eau (filtration, digestion) et de leur analyse en éléments majeurs et traces par ICP OES et MS.

BIOTRACE RHONE-2025-04-IMBE-EQUIPE 3 (Responsable Stéphanie Fayolle-Sanna, membre équipe : IE)

- L'IMBE aura la charge de l'analyse des populations phytoplanctoniques (diatomées, algues vertes, brunes, rouges) par microscopie (morphométrie) ; une attention particulière sera portée aux cyanobactéries et à leur toxicité. Il pourra intervenir avec l'ASNR ou le CEREGE sur le terrain afin de collecter des échantillons d'eau.

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

(3 000 caractères espaces compris)

• Contexte général

En France, les suivis réalisés sur la période 1977-2015 en amont de centrales nucléaires indiquent une augmentation de la température de l'eau et une réduction des débits ainsi qu'une augmentation de la fréquence des événements couplant bas débit et température de l'eau élevée (Maire et al., 2019 ; Arevalo et al., 2020 ; BRLi, 2022). Dans le cas du Rhône, depuis 1970, la température moyenne annuelle de l'eau du fleuve a augmenté de 2,2 °C dans son secteur nord, près du lac Léman, et de 4,5 °C au sud, dans la région de Beaucaire (Gard) (Moatar et Gailhard, 2006). L'impact de la diminution des débits et de l'augmentation de la température des eaux sur les écosystèmes aquatiques a été mis en évidence pour de nombreux fleuves français depuis près de vingt ans et il est largement documenté (e.g., Daufresne et al. 2004 ; Khalanski et al., 2009, Maire et al., 2019). En revanche, les **conséquences des bas débits et des échauffements des cours d'eau sur la distribution et le transfert des contaminants traces** ne sont pas renseignées.

Dans les cours d'eau, les matières en suspension (MES) constituent des vecteurs majeurs pour la fixation et le transfert des contaminants traces (e.g., Tomczak et al. 2021). Elles sont le plus généralement détritiques et proviennent de l'érosion des sols du bassin versant et des cascades sédimentaires (Meybeck 2005 ; Seyler et al. 2005 ; Bouillon et al. 2012 ; Savoye et al. 2012 ; Higuera et al. 2014 ; Eyrolle et al., 2022). Le phytoplancton, dont la taille peut varier de moins d'un micromètre à plusieurs dizaines de micromètres (Sieburth et al., 1978), constitue des MES organiques et particulièrement labiles, dites autochtones ou biogènes par opposition aux MES allochtones ou détritiques, et l'un des premiers maillons de la chaîne trophique des cours d'eau.

La production de phytoplancton est généralement limitée par une turbidité élevée et/ou une teneur restreinte en éléments nutritifs ; Elle s'accroît en revanche avec la diminution des débits et des vitesses d'écoulement, ainsi qu'avec l'augmentation de l'ensoleillement et de la température de l'eau (Giblin et al., 2022; Graham et al., 2018, 2020; Manier et al., 2021 ; Bazin *et al.*, 2024). Aussi, lors des sécheresses hydrologiques et/ou avec l'augmentation de la température de l'eau des cours d'eau, les particules détritiques se raréfient au profit des particules biogènes. Elles constituent alors des supports de fixation préférentiels pour les contaminants traces sur lesquels ces éléments s'adsorbent (échanges solides/solution) et/ou sont bio-intégrés (bioaccumulation). Les particules phytoplanctoniques produites sont consommées par des animaux planctoniques (zooplancton), prédatés à leur tour par des organismes plus grands (poissons), jouant ainsi un rôle de transfert majeur des contaminants traces vers la chaîne trophique.

La distribution des contaminants dans ces conditions hydrologiques, amenées à s'accroître dans les prochaines décennies en raison du changement climatique, est extrêmement peu connue sur le Rhône alors qu'elle impacte directement la qualité de la ressource en eau ainsi que le transfert des contaminants vers la chaîne trophique.

• Contexte ZABR :

Le projet BIOTRACE RHONE s'inscrit dans la thématique « Changement Climatique et ressources » de la ZABR : Question N°2 « Quels sont les impacts du changement global sur les ressources, sur le fonctionnement et les capacités de résilience des écosystèmes aquatiques ? », en particulier dans l'objectif (4) « Déterminer

les impacts du réchauffement climatique sur les écosystèmes aquatiques ». Pour l'Agence de l'Eau, le projet BIOTRACE renseigne une question de degré 1 (en attente pas d'action engagée) de la question N°3 : « Quel est le devenir des substances dans les milieux aquatiques perturbés ? » ; sous question : « Quel est le devenir de la qualité des milieux en contexte de réchauffement climatique ? »

Le projet exploratoire CANADER dédié à la caractérisation de la nature des particules transportées lors des étiages du Rhône (OHM Vallée du Rhône, 2020-2021) avait souligné les difficultés de récolter des matières en suspension autochtone et s'était focalisé sur les flux solides. BIOTRACE RHONE s'appuiera sur une démarche indirecte, basée sur l'analyse des corrélations à partir d'enregistrements à haute fréquence de nombreux paramètres influant sur la production phytoplanctonique et de préleveurs automatiques, sur deux stations de suivi de l'OSR. Il s'intéressera aux distributions solides/solution des contaminants.

Par ailleurs, l'IMBE associé au projet BIOTRACE RHONE aux côtés du CEREGE et de l'ASNR s'intéressera à la caractérisation des communautés phytoplanctoniques afin d'identifier les espèces les plus réactives aux épisodes de sécheresses hydrologiques et de stress thermique, ainsi que celles particulièrement impliquées dans les mécanismes de fixation des métaux traces. Les cyanobactéries, susceptibles de former des efflorescences sous l'effet d'une thermie élevée seront recensées et dénombrées. Les cyanobactéries potentiellement toxiques seront surveillées et leur toxicité sera évaluée par des tests appropriés.

Thématique ZABR : Changement climatique et Ressources ; Question N°2 ;

Site Atelier ou Observatoire ZABR : Observatoire des Sédiments du Rhône ;

Besoin de connaissance Agence de l'eau : Question N°3 : « Quel est le devenir des substances dans les milieux aquatiques perturbés ? » ; sous question : « Quel est le devenir de la qualité des milieux en contexte de réchauffement climatique ? » classée en degré 1 (en attente, pas d'action engagée).

FINALITE ET ATTENDUS OPERATIONNELS

(3 000 caractères espaces compris)

- **Objectifs scientifiques**

Le projet a pour objectif d'évaluer la dynamique du phytoplancton et son rôle dans la fixation et le transfert des contaminants tout au long d'une année hydrologique. La famille de contaminants traces choisie sera celle des métaux. La difficulté de collecter à des fins d'analyses des particules phytoplanctoniques dans les cours d'eau, et notamment les fleuves, en raison de leur faible représentation dans la grande majorité de situations hydrologiques, induit d'appliquer une approche indirecte. Ainsi, il s'agira **i)** de mesurer à haute fréquence les paramètres hydrologiques, physico-chimiques ou climatiques (e.g. pH, oxygène dissous, conductivité, nutriments, turbidité, température, ensoleillement, débit, vitesse des écoulement, hauteur d'eau) jouant un rôle majeur sur la production de particules biogènes, **ii)** d'échantillonner de l'eau par préleveurs automatiques afin d'analyser les teneurs en nutriments, les métaux dissous et particuliers et la typologie du phytoplancton **iii)** de hiérarchiser ces paramètres par analyses statistiques et l'utilisation de modèles IA afin d'identifier les liens de causalité, **iv)** de déterminer les capacités de pompage biologique des contaminants traces par les particules biogènes et **v)** de calibrer des modèles de production primaire par approche IA (apprentissage) et par modélisation NPZD (Nutriment, Phytoplankton, Zooplankton, Détritus) (Tian et al., 2015) à partir desquelles il sera possible ensuite d'effectuer des projections sur la base de scénarios de changement climatique.

Ces axes de recherches combinent les disciplines de l'hydrologie, de la géochimie, de la biochimie et des mathématiques et reposent sur des approches scientifiques et méthodologiques exploratoires et particulièrement innovantes en rivière.

- **Attendus opérationnels**

Les jeux de données conséquents, acquis en partie à partir d'enregistrements à haute fréquence, permettront de renseigner les valeurs de nombreux paramètres pressentis influant la production phytoplanctonique. Des jeux de données importants concernant la distribution solide/solution des métaux traces pour différentes conditions hydrologiques seront également acquis dans le cadre du projet. D'un point

de vue opérationnel, ces jeux de données devraient permettre **i)** d'évaluer l'impact des bas débits et/ou de l'augmentation de la température de l'eau sur la production phytoplanctonique, **ii)** d'évaluer les perturbations potentielles de la distribution des métaux traces entre l'eau et les matières en suspension en fonction des productions phytoplanctoniques, **iii)** de poser les bases de modélisation pour extrapoler aux scénarios de changement climatique et apporter des éléments de réponses sur l'évolution de la qualité des milieux et de la ressource en eau.

Ces résultats s'appuieront en particulier sur **a)** des modèles mécanistiques de production phytoplanctonique dans les cours d'eau (modèle NPZD) qui seront calibrés dans le cadre du projet, **b)** des modèles basés sur l'intelligence artificielle qui permettront des projections de la qualité de la ressource en eau en fonction des scénarios de changement climatiques.

DESCRIPTIF DETAILLE

(4000 caractères espace compris) :

- **Méthodologie**

L'approche méthodologique consiste à identifier les paramètres physico chimiques et biochimiques clés jouant sur la production phytoplanctonique (T° , turbidité, oxygène dissous, teneurs en nutriments, ...), et à évaluer les modifications de distribution des métaux traces entre l'eau et les matières en suspension en fonction de la représentation du matériel autochtone. Des enregistrements à haute fréquence des paramètres physico chimiques de l'eau et des concentrations en pigments chlorophylliens (proxy des particules phytoplanctoniques) seront réalisées à l'aide de sondes autonomes positionnées dans le Rhône (SORA) ainsi que dans la Durance (station OSR) durant *a minima* une année hydrologique. Ces stations OSR sont instrumentées depuis de très nombreuses années, sont à proximité des laboratoires des équipes impliquées dans le projet et caractérisent des hydrosystèmes aux caractéristiques géo-climatiques et hydrologiques marquées (partie aval d'un fleuve/régime torrentiel) permettant ainsi d'appréhender des variabilités intrinsèques de large amplitude. Cette instrumentation sera complétée par des échantillonnages d'eau par préleveurs automatiques afin d'analyser les teneurs en nutriments et les métaux dissous et particuliers. Les jeux de données seront exploités par des analyses statistiques et alimenteront des modèles basés sur l'Intelligence Artificielle (IA) afin d'identifier les liens de cause à effet entre les différents paramètres mesurés.

Acquisition des jeux de données : L'approche s'appuie sur une acquisition haute fréquence (une mesure toutes les 15 minutes) de la température, l'oxygène dissous, la conductivité, la turbidité, le pH et des **pigments chlorophylliens (chl-a)** en utilisant une **instrumentation par sondes et capteurs** positionnée sur le Rhône aval (SORA) ainsi que sur la Durance (station OSR). Un exemple d'enregistrements sur le Rhône aval est présenté **Figure 1** (résultats non publiés). La relation entre chl-a et biomasse algale varie en fonction des espèces, de la température, de la lumière et de la disponibilité des nutriments (Geider, 1987), mais la chl-a est utilisée communément comme indicateur de la biomasse algale (Cloern et al., 1995). L'approche méthodologique repose également sur des prélèvements séquentiels d'eau (3 échantillonnages/semaine) par l'utilisation de **préleveurs automatiques** (autonomie des batteries : 1 mois) et des campagnes de prélèvement afin de réaliser **(1)** les analyses permettant de calibrer les sondes de turbidité (MES) et de pigments chlorophylliens (chl-a), **(2)** les analyses de nutriments (carbone organique dissous, carbone organique particulaire, nitrate, nitrite, ammonium, orthophosphate, silicate, azote organique dissous, phosphore organique dissous, azote particulaire, phosphore particulaire), **(3)** les analyses des métaux traces dissous et particulaire, et **(4)** l'identification des populations de phytoplanctons dont les cyanobactéries.

Environ 200 échantillons seront collectés par site au cours des 2 années du projet. Les échantillons d'eau seront filtrés pour séparer les phases dissoute et particulaire. Chacune de ces fractions sera analysée par ICP OES selon les protocoles pratiqués au sein de l'OSR, afin de déterminer les concentrations dissoute et particulaire d'un certain nombre d'éléments majeurs et traces. L'analyse des métaux traces et majeurs dans ce projet sera réalisée au CEREGE dans la continuité des travaux menés dans le cadre de l'OSR 7 (ex. : Suivi mensuel des stations et les actions ciblées de type inter comparaison des outils de collecte des MES (action E1) ; Analyse de la distribution spatiale des contaminants sur le linéaire du Léman à la mer (action B4). Dans ces différentes actions en cours, certains éléments traces métalliques d'intérêt sont particulièrement ciblés. C'est le cas notamment de Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd. Cependant, dans des actions plus exploratoires,

l'analyse d'un panel d'éléments plus large est généralement réalisée, afin de faire ressortir d'éventuelles coévolutions et relations sous-jacentes. Il s'agit alors de 45 éléments traces analysés en ICP MS + 19 éléments majeurs analysés en OES. Le projet BIOTRACE RHONE s'inscrit dans cette vocation exploratoire, avec son analyse haute fréquence de deux stations de l'OSR et la compréhension des effets de saison.

Les échantillons de phytoplancton seront collectés dans des bouteilles stériles (1L) et fixés au formol in situ. Les communautés phytoplanctoniques seront caractérisées par microscopie optique (identification des espèces, morphométrie, architecture/traits fonctionnels) et les toxines des efflorescences cyanobactériennes seront dosées (Tests ÉLISA, Microcystines ADDA) ;

Analyses statistiques et modélisation par Intelligence Artificielle (IA) : Les séries temporelles acquises apporteront des informations sur l'amplitude des variations et le phasage des paramètres. La température de l'eau sera en outre modélisée à partir du modèle développé par Toffolon M. et Piccolroaz S. (2015) à partir des enregistrements de la température de l'air et des débits ou bien par les modèles en cours de développement au sein de l'équipe ASNR. Des analyses statistiques de corrélation entre les différents paramètres permettront d'identifier les moteurs majeurs de la production algale en soulignant en particulier le rôle de la température de l'eau. L'évolution de la production algale, en fonction des moteurs identifiés, ainsi que son rôle dans le piégeage des contaminants étudiés, sera approchée par IA, à partir des modèles déjà développés par le laboratoire (e.g. Thèse T. Hamadene, ASNR) et en s'appuyant sur les jeux de données, en nombre particulièrement conséquent (e.g. > 500 000 données de T°). Des modèles mécanistiques de type NPZD (Nutriments, Phytoplancton, Zooplancton, Détritus) pourront également être déployés. Les modèles IA permettront d'établir des projections sur la contamination des milieux en utilisant les scénarios de changement climatique, en particulier les projections hydro climatiques de EXPLORE 2 déjà utilisées par l'équipe ASNR.

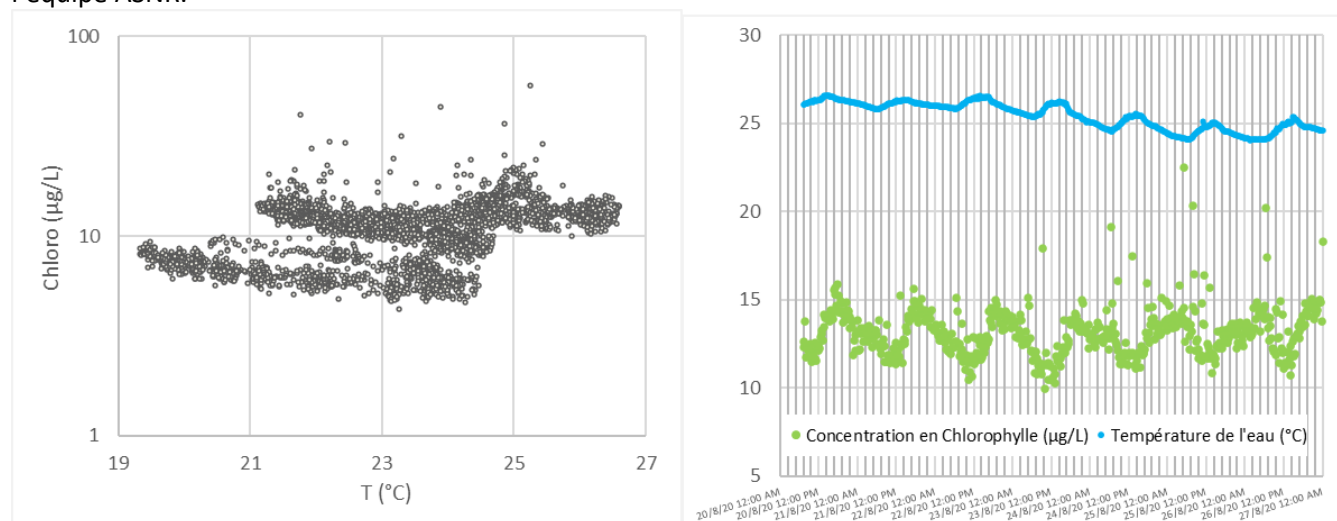


Figure 1 : Exemples de données acquises (IRS) à partir de capteurs de température et de pigments chlorophylliens installés sur le Rhône aval entre le 20/08/2020 et le 01/10/2020 (n=4060) ; Les températures maximales de l'eau sont enregistrées entre 13h00 et 15h00 alors que les teneurs maximales en Chlorophylle sont observées entre 18h00 et 20h00 (non publié).

LIVRABLES : Rapport final (Janvier 2028)

DUREE DU PROJET :

- Date de début : Janvier 2026
- Date de fin : janvier 2028
-

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Arevalo E., Lassalle G., Tétard S., Maire A., Sauquet E., Lambert P., Paumier A., Villeneuve B., Drouineau H., 2020, An innovative bivariate approach to detect joint temporal trends in environmental conditions: Application to large French rivers and diadromous fish, Science of The Total Environment, 748, 141260, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141260>.

- Bazin S., Diouloufet V., Molina A., Peroux T., Jose M. Montoya Edeline E., Jacquet S., Rasconi S., **Fayolle S.**, Zambeaux T., Leclerc C., Lassus R., Morla J., Daufresne M. and Sentis A. (2024) : Direct effect of artificial warming on communities is stronger than its indirect effect through body mass reduction. OIKOS <https://nsojournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/oik.10561>
- Bennett, M. G., Lee, S. S., Schofield, K. A., Ridley, C. E., Washington, B. J., & Gibbs, D. A. (2021). Response of chlorophyll a total nitrogen and total phosphorus concentrations in lotic ecosystems: A systematic review. *Environmental Evidence*, 10(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s13750-021-00238-8>
- Berrojalbiz N., Dachs J., Jose Ojeda M., Carmen Valle M., Castro-Jimenez J., Wollgast J., Ghiani M., Hanke G., Zaldivar J.M. (2011) Biogeochemical and physical controls on concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and plankton of the Mediterranean and Black Seas. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 25, GB4003, <https://doi.org/10.1029/2010GB003775>.
- Bodereau N. (2023) Sources et comportement du Carbone 14 dans un fleuve nucléarisé, Thèse de l'Université d'Aix Marseille.
- Bodereau N., Eyrolle F., Copard Y., Dumoulin J.P., Lepage H., Raimbault P., Giner F., Mourier D., Gurriaran R., 2024, ¹⁴C cycling in a nuclearized river: a first study in the downstream part of the Rhône River (France), *Water Resources Research*, submitted.
- Bouillon S, Yambele A, Spencer RGM, Gillikin DP, Hernes PJ, Six J, Merckx R, Borges AV (2012) Organic matter sources, fluxes and greenhouse gas exchange in the Oubangui River (Congo River basin). *Biogeosciences* 9:2045–2062.
- BRLi, 2022, Etude de l'hydrologie du fleuve Rhône sous changement climatique – Mission 1 : Diagnostic actualisé de la situation hydrologique du fleuve.
- Daufresne M., Roger M.C., Capra H., Lamouroux N. (2004) Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhone River : effects of climatic factors. *Global Change Biology* 10 : 124-140.
- Ding Q., Xionghu Gong X., Miao Jin M., Xiaolong Yao X., Lu Zhang L., Zhonghua Zhao Z. (2021) The biological pump effects of phytoplankton on the occurrence and benthic bioaccumulation of hydrophobic organic contaminants (HOCs) in a hypereutrophic lake, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 213, 112017, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112017>.
- Eyrolle F., Radakovitch O., Copard Y., Lepage H., Bodereau N., Raimbault P., Dabrin A., Lagadec V., Le Corre C. (2022) ¹⁴C and OBT dependencies upon Particulate Organic Matter within the nuclearized Rhone River (France), *Journal of Soils and Sediments*, <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03227-7>
- Galban-Malagon C.J., Del Vento S., Berrojalbiz N., Ojeda M.J., Dachs J. (2013) Polychlorinated biphenyls, hexachlorocyclohexanes and hexachlorobenzene in seawater and phytoplankton from the Southern Ocean (Weddell, South Scotia, and Bellingshausen Seas), *Environ. Sci. Technol.*, 47, 11, 5578-5587.
- Giblin, S. M., Larson, J. H., & King, J. D. (2022) Environmental drivers of cyanobacterial abundance and cyanotoxin production in backwaters of the Upper Mississippi River. *River Research and Applications*, 38(6), 1115–1128. <https://doi.org/10.1002/rra.3987>
- Graham, J. L., Foster, G. M., Williams, T. J., Mahoney, M. D., May, M. R., & Loftin, K. A. (2018) Water-quality conditions with an emphasis on cyanobacteria and associated toxins and taste-and-odor compounds in the Kansas River, Kansas, July 2012 through September 2016. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2018– 5089. 55. <https://doi.org/10.3133/sir20185089>
- Graham, J. L., Dubrovsky, N. M., Foster, G. M., King, L. R., Loftin, K. A., Rosen, B. H., & Stelzer, E. A. (2020) Cyanotoxin occurrence in large rivers of the United States. *Inland Waters*, 10(1), 109–117. <https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1700749>
- Hardenbicker P., Viergutz C., Becker A., Kirchesch V., Nilson E., Fischer H. (2017) Water temperature increases in the river Rhine in response to climate change, *Reg Environ Change*, 17, 299–308.
- Higuera M, Kerherve P, Sanchez-Vidal A, Calafat A, Ludwig W, Verdoit-Jarraya M, Heussner S, Canals M (2014) Biogeochemical characterization of the riverine particulate organic matter transferred to the NW Mediterranean Sea. *Biogeosciences* 11:157–172.
- IPCC (2023) Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Jiménez Cisneros B. E., Oki T. (2014) Freshwater resources. In: *Climate change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects*. In C. B. Field, et al. (Eds.), *Contribution of working group II to the fifth assessment report of the IPCC* (pp. 229–269). Cambridge University Press
- Khalanski M., Carrel G., Desaint B., Frugé J.-F., Olivier J.-M., Poirel A., Souchon Y. (2008) Étude thermique globale du Rhône – Impacts hydrobiologiques des échauffements cumulés, *Global thermal study of the Rhone – Hydrobiological impact of cumulative warming* *Hydroécol. Appl.* Tome 16, pp. 53–108 © EDP Sciences, 2009 DOI: 10.1051/hydro/2009005

- Lepage H., Nicoulaud-Gouin V., Pele K., Boyer P. (2023) Use of machine learning and deep learning to predict particulate ¹³⁷Cs concentrations in a nuclearized river, *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 270, 107294. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X2300187X?dgcid=author>
- Maire A., Thierry A., Viechtbauer W., Daufresne M. (2019) Poleward shift in large-river fish communities detected with a novel meta-analysis framework, *Freshwater Biology*, 64, 1143–1156. <https://doi.org/10.1111/fwb.13291>
- Manier, J. T., Haro, R. J., Houser, J. N., & Strauss, E. A. (2021). Spatial and temporal dynamics of phytoplankton assemblages in the Upper Mississippi River. *River Research and Applications*, 37(10), 1451–1462. <https://doi.org/10.1002/rra.3852>
- Meybeck M (2005) Origins and behavior of carbon species in world rivers, In: Roose and Lal (Eds.) 2005. *Erosion and carbon dynamics*, *Advances in Soil Sciences Series*, CRC Boca Raton, pp 209-238.
- Moatar F., Gailhard J. (2006) Water temperature behaviour in the river Loire since 1976 and 1881, *C. R. Geoscience*, 338, 319–328.
- Parmet B., Kwadijk J., Raak M. (1995) Impact of climate change on the discharge of the river rhine, *Studies in Environmental Science*, 65, 911-918.
- Pougnet F. (2018) *Etat de la qualité des eaux de l'estuaire de la Gironde : cas du cadmium et des butylétains*, Thèse de l'Université Bordeaux I, 12 février 2018.
- Savoye N, David V, Morisseau F, Etcheber H, Abril G, Billy I, Charlier K, Oggian G, Derriennic H, Sautour B (2012) Origin and composition of particulate organic matter in a macrotidal turbid estuary: The Gironde Estuary, France. *Estuar Coast Shelf Sci* 108:16–28.
- Sieburth, J. McN., V. Smetacek and J. Lenz (1978) Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnol. Oceanogr.* 23:1256-1263.
- Seyler P, Coynel A, Moreira-Turcq P, Etcheber H, Colas C, Orange D, Bricquet JP, Laraque A, Guyot JL, Olivry JC, Meybeck M (2005) Erosion and carbon dynamics: conclusions and perspectives. *Organic Carbon Transported by the Equatorial Rivers: Example of Congo-Zaire and Amazon Basins* In: *Soil Erosion and Carbon dynamics*, Roose E., Lal R., Feller C, Barthes B, Stewart BA (eds) *Advances in Soil Science Series*, CRC Press, Boca Raton, pp 255–274.
- Tian R, Chen C, Qi J, Ji R, Beardsley R.C. and Davis C (2015) Model study of nutrient and phytoplankton dynamics in the Gulf of Maine: patterns and drivers for seasonal and interannual variability. *ICES J. Mar. Sci.*, 72, pp 388-402.
- Toffolon M., Piccolroaz S. (2015) A hybrid model for river water temperature as a function of air temperature and discharge *Environ. Res. Lett.* 10, 114011.
- Tomczak W, Boyer P, Eyrolle F, Radakovitch O, Lepage H, Amielh M, Anselmet F (2021) Modeling solid / liquid fractionation of trace elements in river systems - application to ¹³⁷Cs in the Rhone River (France). *Environ Modell Softw* 145:105211.