

Caractérisation des concentrations en PFAS dans les sédiments mobilisés par les projets de restauration écologique sur les marges alluviales du Rhône.

Characterization of PFAS levels in sediment involved in ecological restoration efforts along the Rhône river's alluvial margins.

Yoann LAFFONT¹, Christophe MOIROUD¹, Claire HENRY¹, Christophe MORA¹, Nedjma SALHI¹, Brice MOURIER²

¹ CNR - 2, rue André Bonin - 69316 LYON – y.laffont@cnr.tm.fr, c.moiroud@cnr.tm.fr, c.henry@cnr.tm.fr, c.mora@cnr.tm.fr, n.salhi@cnr.tm.fr,

² ENTPE, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, CNRS, UMR 5023 - LEHNA, Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés, 3, Rue Maurice Audin - F-69518 Vaulx-en-Velin Cedex France
brice.mourier@entpe.fr

RÉSUMÉ

La CNR porte, en partenariat avec la DREAL, l'Agence de l'Eau RMC et les territoires, un programme de restauration écologique du fleuve visant à l'atteinte du bon potentiel écologique des masses d'eau. La survenue de la crise des PFAS au cours des études de conception d'un projet de restauration, comprenant des actions de réinjection sédimentaire, situé en aval de l'une des sources industrielles identifiée, et en interface avec les usages de l'eau (adduction d'eau potable, irrigation), a conduit à investiguer la contamination des stocks sédimentaires mobilisés par le projet pour évaluer le risque sanitaire lié à l'opération. Les résultats font état de concentrations faibles au regard des rejets industriels situés en amont et dans le canal usinier. Une phase test de réinjection est prévue au démarrage des travaux, assorti d'un suivi des concentrations dans les eaux de surfaces et de nappes, pour s'assurer de l'absence d'incidence de l'opération. En outre, des analyses sont déployées à l'échelle du programme de restauration, permettant d'acquérir de la connaissance sur la contamination aux PFAS des sédiments accumulés sur les marges alluviales à l'échelle de l'axe Rhodanien.

ABSTRACT

CNR, in partnership with administration and the Water Agency, carries a program for the ecological restoration of the river aimed at achieving good ecological potential of the water bodies. The emergence of the PFAS crisis during the design studies of a restoration project, which includes sediment re-injection actions, located downstream from one of the industrial sources identified, and at the interface with water uses (drinking water supply, irrigation), led to an investigation into the contamination of sediment stocks mobilized by the project to assess the health risk associated with the operation. The results indicate low concentrations compared to the industrial discharges upstream. A test phase of re-injection is planned at the start of the work, accompanied by monitoring of concentrations in surface and groundwater, to ensure the harmlessness of the operation. Furthermore, analyses are deployed at the scale of the restoration program, allowing for the acquisition of knowledge on PFAS contamination of sediments at the scale of the Rhone axis.

MOTS CLÉS

Perfluorés, Réinjection sédimentaire, Rhône, Restauration écologique, PFAS, Sediment injection, Rhône river, Stream restoration,

1 CONTEXTE

1.1 Programme de restauration écologique du Rhône

En partenariat avec l'Agence de l'Eau RMC et la DREAL AURA, la CNR porte un vaste programme de restauration écologique, qui s'inscrit dans la continuité de travaux réalisés depuis le début des années 2000 à l'échelle de l'ensemble du fleuve. La prise de conscience des dysfonctionnements morphologiques du fleuve, au travers des travaux de l'Observatoire des Sédiments du Rhône notamment, a conduit depuis la fin des années 2000, à intégrer la restauration des processus de dynamique alluviale dans la conception des projets. Des premiers travaux pilotes de démantèlement des anciens ouvrages Girardon, qui ont cloisonné les marges du fleuve en un lieu d'accumulation sédimentaire et qui contraignent la dynamique érosive latérale (Seignemartin, 2020), ont été réalisés dès 2009 à Pont-Saint-Esprit, suivi de nombreux projet à l'échelle du bas-Rhône. Depuis 2016, la plupart des travaux entrepris incluent des actions de restauration active (recreusement de îles, de zones humides) et des actions de restauration de la dynamique fluviale par démantèlement des ouvrages Girardon. Par leur conception, les travaux de restauration écologique du Rhône occasionnent la restitution au fleuve de sédiments accumulés au fil du temps sur les marges de deux façons : par la réinjection directe des déblais alluvionnaires, et par la restauration des potentialités d'érosion du stock interne que constituent les casiers Girardon. Depuis 2008 et la gestion de la contamination au PCB, chaque projet de restauration de la dynamique fluviale est précédé d'une caractérisation fine de la contamination du stock sédimentaire. L'émergence de la « crise des PFAS » en 2022 au droit de la plateforme industrielle de Pierre-Bénite et du « couloir de la chimie » a été concomitante des études de conception du projet de restauration d'Irigny, Vernaison et Feyzin ; situé quelques kilomètres en aval. En conséquence, la caractérisation des taux de PFAS dans les sédiments mobilisés par le projet a été intégrée aux études. L'enjeu eau potable (présents tout au long du fleuve) impose cette acquisition de connaissance. Par la suite, cette démarche a été étendue à trois autres projets listés dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1. Sites de travaux en cours ou à venir.

Site de travaux	Irigny, Vernaison, Feyzin	Casiers de Vion, Chambon	Champfort	Saulce / Gouvernement
Aménagement CNR	PB	SV/BV	BE	LN
PK (amont - aval)	6.5 - 11.5	84.5 - 89	120.2 - 120.6	140 - 143
Période de réalisation des travaux	2024 – 2027 (en cours)	2025 - 2032	2025-2026	2024-2026 (en cours)
Volumes de sédiments terrassés (m ³)	390 000	972 000	58 000	190 000
Volume de sédiments fins remis au fleuve (m ³)	65 000	125 000	53 000	158 000

PB = Pierre-Bénite, SV = Saint-Vallier, BV = Bourg-lès-Valence, LN = Baix-le-Logis-neuf

1.2 Contexte des PFAS sur le Rhône

L'utilisation et/ou la production de substances perfluorées et perfluoro -alkylés dans le « couloir de la chimie » est documentée depuis la fin des années 1950, avec l'implantation sur le site de la Société des Résines Fluorés ; plusieurs composés seront produits ou utilisés au cours du temps, par plusieurs usines distinctes (Arkema, 2023).

Les premières données sur les concentrations en PFAS dans les sédiments du Rhône sont issues de carottes sédimentaires réalisées en 2012 entre l'amont du confluent de l'Ain (pk -39) et l'aval du barrage de Vaugris (pk 38), de part et d'autre de l'agglomération Lyonnaise (Mourier *et al.*, 2019). Ces données mettent en évidence des concentrations en PFAS nettement supérieures à l'aval du couloir de la chimie, avec une signature chimique caractérisée par une prédominance des acides carboxyliques (PFCA), les acides sulfoniques (PFSA) étant majoritaires à l'amont de Lyon. En outre, la datation des carottes montre que les concentrations les plus fortes sont enregistrées dans les sédiments accumulés entre le début des années 1990 et le début des années 2000.

2 APPROCHE METHODOLOGIQUE

2.1 Analyse diachronique de l'évolution des sites et méthodologie d'échantillonnage

La caractérisation des contaminants dans les sédiments mobilisés par les projets de restauration de la dynamique fluviale suit depuis 2013 la méthodologie établie par la DREAL. Celle-ci repose sur l'analyse diachronique préalable de l'occupation du sol, permettant d'identifier des secteurs homogènes en termes de cinétiques

d'accrétion. Un profil de carottage est positionné au droit de chaque secteur homogène, les carottages au sein de chaque profil étant positionnés de façon à cibler des périodes d'accrétion distinctes, l'effort de prospection étant concentré dans les zones de sédimentation correspondant aux années 1970, période ayant connu le maximum des émissions de PCB. En 2023, un groupe de travail sur le sujet des PFAS dans les sédiments s'est constitué sous l'égide de la DREAL, rassemblant des membres de la communauté scientifique (ENTPE, INRAE) et des gestionnaires du fleuve (CNR, VNF, Métropole de Lyon, Fédération de pêche). Dans ce cadre, le plan d'échantillonnage établi en 2019 sur le site d'Irigny, Vernaison et Feyzin a été adapté pour concentrer l'effort de prospection dans la période d'accrétion 1980-2000, et dans les emprises de terrassements, désormais connues à ce stade d'avancement des études. 34 carottages ont été effectués sur les marges alluviales du site en août 2023, correspondant à 61 échantillons de sédiments prélevés, complétés par 3 échantillons prélevés dans des sédiments de surface dans le lit du Rhône (aux PK-27, 15 et 27) afin de caractériser des sédiments récemment déposés en amont et en aval du projet.

La même méthodologie a été déployée sur les sites du Chambon et de Champfort, encore au stade étude en 2024, complétés par le prélèvement de sédiments récents dans le lit du Rhône au PK88. Sur les sites de Saulce et Gouvernement, dont les travaux ont commencé antérieurement à la démarche, 2 échantillons ont été prélevés en cours de travaux sur des sédiments fins homogénéisés par les terrassements en amont de leur réinjection.

2.2 Molécules analysées

Pour chaque échantillon, 25 molécules ont été analysées, dont les 20 molécules de l'annexe I de la directive européenne sur les eaux destinées à la consommation humaine du 16 décembre 2020, incluant les deux composés réglementés à ce jour (PFOS et PFOA), ainsi que le 6:2 FTS dont l'interdiction d'utilisation sur la plateforme de Pierre-Bénite est entrée en vigueur en 2024. Sur ces 25 molécules, 11 appartiennent à la famille des PFCA et 14 à celles des PFSA.

3 RESULTATS

3.1 Sites d'Irigny, Vernaison et Feyzin

La répartition des PFAS au sein des casiers Girardon apparaît diffuse et relativement homogène au sein du site. La concentration moyenne pour la somme des 25 composés analysés se situe à 11.31 µg/kg de sédiment (30 carottages et 54 échantillons). La concentration maximale mesurée au sein d'un échantillon est de 28.89 µg/kg. Ces concentrations apparaissent assez faibles au regard des valeurs qu'elles peuvent atteindre dans des sols ayant subi une contamination directe : des concentrations de plusieurs milliers de microgramme par kilogrammes sont rapportées par la littérature sur certains sites (Reinikainen *et al.*, 2022). La signature chimique caractérisée par une prédominance des PFCA est retrouvée pour la très large majorité des échantillons. Aucune tendance nette ne se dégage dans la répartition verticale des concentrations, ce qui tient au moins pour partie à la méthode d'échantillonnage verticale qui vise moins à caractériser finement la stratification verticale qu'à déterminer la masse de PFAS remobilisable par les travaux de restauration.

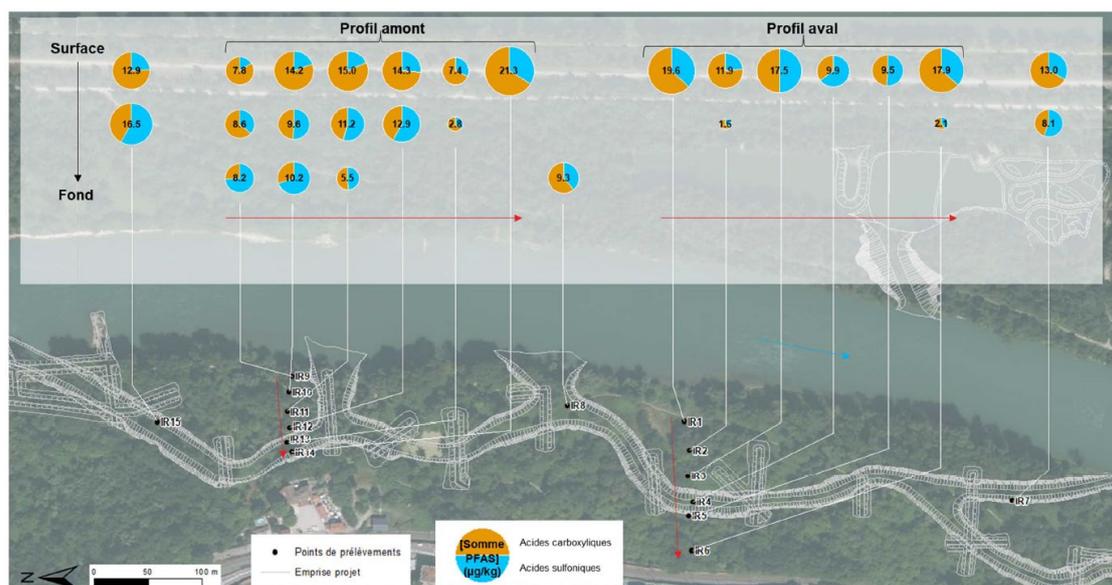


Figure 2. Concentrations mesurées pour la somme des PFAS dans les échantillons prélevés sur les casiers d'Irigny.

Les échantillons prélevés dans des annexes hydraulique reflétant la sédimentation récente (lônes restaurée et darse draguée au début des année 2000, 7 échantillons) se caractérisent par une concentration moyenne moindre de 4.97 µg/kg, en cohérence avec les données sur l'historique des émissions. Enfin, les concentrations dans les sédiments prélevés dans les dépôts récents dans le lit mineur du Rhône, présentent des concentrations inférieures ou égale au microgrammes par kilogramme pour la somme des PFAS. Sur la base de ces résultats, la masse totale de PFAS potentiellement remobilisée a pu être établie à une valeur comprise entre 5 et 7 kg (incluant les matériaux remis directement au Rhône et l'érosion post travaux des matériaux au sein des casiers). Cette quantité, très faible au regard des données sur les rejets historiques, peut s'expliquer par une localisation des principaux rejets industriels dans le canal usinier, qui rejoint le Rhône en aval du site, et un comblement des casiers principalement avant années 1980, antérieur au maximum des émissions. Sur cette base, les flux de PFAS occasionnés en phase travaux et post travaux ont été estimés ; en l'absence de référentiel réglementaire, ils ont été rapportés aux données transmises par l'administration sur les flux industriels en amont du projet de restauration en 2023. Les flux de PFAS occasionnés par le projet apparaissent 80 à 650 fois inférieurs à ces rejets industriels pour la phase travaux, et 500 à 7500 fois inférieurs au-delà.

3.2 Lit mineur du Rhône et autres sites de travaux

Les premières données collectées pour les projets de restauration à l'étude plus à l'aval révèlent des concentrations du même ordre de grandeur qu'à Pierre-Bénite, ainsi qu'une homogénéité semblable, dans les casiers Girardon de l'aménagement de Saint-Vallier, plus 80 kilomètres à l'aval de Lyon.

Tableau 2. Moyennes de la somme des PFAS à l'échelle des projets de restauration écologique.

PK	-27	6.5 - 11.5		15	27	84.5 - 89	88	120.2 - 120.6	140 - 143
Aménagement CNR	-	PB			VS	SV/BV		BE	LN
Milieu	Rhône	Casiers	Annexes	Rhône	Rhône	Casiers	Rhône	Casiers	Casiers
Nb échantillons	1	54	7	1	1	28	1	20	2
$\bar{x} [\sum PFAS]$ (µg/kg)	0.75	11.31	4.97	0.45	1.09	10.62	1.45	(en cours)	7.95

PB = Pierre-Bénite, SV = Saint-Vallier, BV = Bourg-lès-Valence, LN = Baix-le-Logis-neuf.

Les échantillons prélevés sur l'aménagement de Baix-le-Logis-neuf, s'ils sont insuffisamment nombreux pour conclure avec robustesse, laissent présager des teneurs semblables à légèrement inférieures, 140 kilomètres à l'aval de Lyon.

4 PHASE TEST DE REINJECTION ET PERSPECTIVES D'INVESTIGATION

Compte-tenu de la sensibilité liée aux usages de l'eau en aval des travaux des sites d'Irigny, Vernaison et Feyzin, la CNR a engagé une étude en partenariat avec le CEREGE pour appréhender les transferts des différentes molécules présentes dans les sédiments prélevés sur site vers la matrice aqueuse. Les résultats montrent une forte solubilité des molécules à courtes chaînes carbonées (CEREGE, 2024). En outre, il a été convenu avec l'administration de réaliser une phase test de réinjection, à hauteur d'un volume de sédiments compris entre 10 000 et 20 000 m³, lors de la première saison de travaux (janvier – février 2025). Cette phase test s'accompagnera d'un suivi des concentrations en PFAS, établi en concertation avec les gestionnaires des champs captant et des prélèvements d'eau pour l'irrigation, dans les eaux de surfaces, en amont et en aval des travaux, ainsi qu'au droit des captages. Les prélèvements d'eau seront effectués à une fréquence d'un par semaine dès la remise des sédiments dans le fleuve, puis 3 mesures par semaine dès l'ouverture du barrage engendrant la reprise des matériaux par le courant. L'objet de ce suivi est de s'assurer de l'absence d'impact de l'opération sur la qualité des eaux des captages. En outre, les données collectées et les méthodologies déployées sont vouées à nourrir les réflexions nécessaires à la prise en compte des PFAS dans les opérations de gestion sédimentaires (réinjection sédimentaire, entretien des lits, etc.).

BIBLIOGRAPHIE

- Seignemartin G. Évolution contemporaine des casiers Girardon" du Rhône : approche géohistorique à partir d'indicateurs morpho-sédimentaires, géochimiques et phytoécologiques. Géographie. Université Lumière Lyon 2. 03766210v2. (2020).
- Arkema, Pierre-Bénite (69), Etude historique et documentaire sur l'usage des PFAS. FRARKPB001-R2. V2 (2023).
- Mourier B. *et al.* Combined spatial and retrospective analysis of fluoroalkyl chemicals in fluvial sediments reveal changes in levels and patterns over the last 40 years, *Environmental Pollution* **253** (2019).
- Reinikainen J. *et al.*, The occurrence, distribution, and risks of PFAS at AFFF-impacted sites in Finland, *Science of the Total Environment* **829** (2022).
- CEREGE, Etude de remobilisation potentielle des PFAS hérités dans le sédiment de berge lors d'une remise en suspension, CNRS, Aix-Marseille Université, en partenariat avec CNR, et avec l'appui de l'OSR (2024).