

	<b>Compte-rendu de fin de projet</b>	

**Projet ANR-19-CE03-0009**

## **TRAJECTOIRE**

Programme PCR AAPG 2019

<b>A</b>	<b>IDENTIFICATION.....</b>	<b>2</b>
<b>B</b>	<b>RESUME CONSOLIDE PUBLIC .....</b>	<b>2</b>
B.1	Instructions pour les résumés consolidés publics .....	2
B.2	Résumé consolidé public en français .....	3
B.3	Résumé consolidé public en anglais.....	5
<b>C</b>	<b>MEMOIRE SCIENTIFIQUE.....</b>	<b>5</b>
C.1	Résumé du mémoire .....	6
C.2	Enjeux et problématique, état de l'art .....	6
C.3	Approche scientifique et technique.....	7
C.4	Résultats obtenus et exploitation des résultats .....	7
C.5	Discussion .....	9
C.6	Conclusions.....	11
C.7	Références.....	11
<b>D</b>	<b>LISTE DES LIVRABLES.....</b>	<b>12</b>
<b>E</b>	<b>IMPACT DU PROJET .....</b>	<b>13</b>
E.1	Indicateurs d'impact .....	13
E.2	Liste des publications et communications.....	14
E.3	Liste des éléments de valorisation.....	16
E.4	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires) .....	18

*Ce document est à remplir par le coordinateur en collaboration avec les partenaires du projet. L'ensemble des partenaires doit avoir une copie de la version transmise à l'ANR.*

*Ce modèle doit être utilisé uniquement pour le compte-rendu de fin de projet.*

## A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	TRAJECTOIRE
Titre du projet	The memory of riverine sediments used to predict the environmental impact of new technologies
Coordinateur du projet (société/organisme)	Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection (ASNR)
Période du projet (date de début – date de fin)	06/01/2020 05/07/2024
Site web du projet, le cas échéant	<a href="#">Le projet TRAJECTOIRE   IRSN</a>

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Mme Frédérique Eyrolle
Téléphone	04 42 19 95 12
Adresse électronique	frederique.eyrolle@asn.fr
Date de rédaction	Juin 2025

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	<b>EPOC</b> (Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux, Université de Bordeaux, CNRS UMR 5805) <b>Jörg Schäfer</b> <b>METIS</b> (Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols, Sorbonne Université, CNRS UMR 7619), <b>Laurence Lestel</b> <b>LEHNA</b> (Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés, CNRS UMR 5023) <b>Brice Mourier</b> <b>LSCE</b> (Laboratoire de Sciences du Climat et de l'Environnement, Gif-sur-Yvette, CNRS CEA UVSQ UMR 8212) <b>Olivier Evrard</b> <b>M2C</b> (Morphodynamique Continentale et Côtière, Université de Rouen, CNRS UMR 6143) <b>Yoann Copard</b> <b>MIO</b> (Mediterranean Institute of Oceanography, Aix-Marseille Université, UMR 7294) <b>Richard Sempéré</b>

## B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

*Ce résumé est destiné à être diffusé auprès d'un large public pour promouvoir les résultats du projet, il ne fera donc pas mention de résultats confidentiels et utilisera un vocabulaire adapté mais n'excluant pas les termes techniques. Il en sera fourni une version française et une version en anglais. Il est nécessaire de respecter les instructions ci-dessous.*

### B.1 INSTRUCTIONS POUR LES RESUMES CONSOLIDES PUBLICS

*Les résumés publics en français et en anglais doivent être structurés de la façon suivante.*

**Titre d'accroche du projet** (environ 80 caractères espaces compris)

Titre d'accroche, si possible percutant et concis, qui résume et explicite votre projet selon une logique grand public : il n'est pas nécessaire de présenter exhaustivement le projet mais il faut plutôt s'appuyer sur son aspect le plus marquant.

Les deux premiers paragraphes sont précédés d'un titre spécifique au projet rédigé par vos soins.

**Titre 1 : situe l'objectif général du projet et sa problématique** (150 caractères max espaces compris)

**Paragraphe 1 :** (environ 1200 caractères espaces compris)

Le paragraphe 1 précise les enjeux et objectifs du projet : indiquez le contexte, l'objectif général, les problèmes traités, les solutions recherchées, les perspectives et les retombées au niveau technique ou/et sociétal

**Titre 2 : précise les méthodes ou technologies utilisées** (150 caractères max espaces compris)

**Paragraphe 2 :** (environ 1200 caractères espaces compris)

Le paragraphe 2 indique comment les résultats attendus sont obtenus grâce à certaines méthodes ou/et technologies. Les technologies utilisées ou/et les méthodes permettant de surmonter les verrous sont explicitées (il faut éviter le jargon scientifique, les acronymes ou les abréviations).

**Résultats majeurs du projet** (environ 600 caractères espaces compris)

Faits marquants diffusables en direction du grand public, expliciter les applications ou/et les usages rendus possibles, quelles sont les pistes de recherche ou/et de développement originales, éventuellement non prévues au départ.

Préciser aussi toute autre retombée= partenariats internationaux, nouveaux débouchés, nouveaux contrats, start-up, synergies de recherche, pôles de compétitivités, etc.

**Production scientifique et brevets depuis le début du projet** (environ 500 caractères espaces compris)

Ne pas mettre une simple liste mais faire quelques commentaires. Vous pouvez aussi indiquer les actions de normalisation

### **Illustration**

Une illustration avec un schéma, graphique ou photo et une brève légende. L'illustration doit être clairement lisible à une taille d'environ 6cm de large et 5cm de hauteur. Prévoir une résolution suffisante pour l'impression. Envoyer seulement des illustrations dont vous détenez les droits.

### **Informations factuelles**

Rédiger une phrase précisant le type de projet (recherche industrielle, recherche fondamentale, développement expérimental, exploratoire, innovation, etc.), le coordonnateur, les partenaires, la date de démarrage effectif, la durée du projet, l'aide ANR et le coût global du projet, par exemple « Le projet XXX est un projet de recherche fondamentale coordonné par xxx. Il associe aussi xxx, ainsi que des laboratoires xxx et xxx). Le projet a commencé en juin 2006 et a duré 36 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de xxx € pour un coût global de l'ordre de xxx € »

## **B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS**

Suivre impérativement les instructions ci-dessus.

### **Les trajectoires de la contamination des fleuves français au cours des 100 dernières années**

**S'appuyer sur l'expérience du passé afin de mieux préparer l'avenir dans un contexte de changement climatique et sociétal**

La « Grande Accélération » industrielle du milieu du siècle dernier a vraisemblablement conduit, dans un contexte de mondialisation, d'essor des progrès scientifique et technique et des modes de communication, à une amplification brutale de l'ensemble des processus d'origine humaine conduisant à modifier l'environnement. Cette période d'accélération a pu

conduire à un manque certain d'informations précises sinon exhaustives sur les conséquences environnementales de cet essor. En France, la surveillance des milieux s'est faite progressivement puis s'est ancrée dans les politiques publiques à partir des années 1990. Aujourd'hui, à l'aube de la 4<sup>ème</sup> révolution industrielle, et alors que l'humanité converge pour sortir durablement de l'ère de l'exploitation intensive des ressources carbonées, la transition énergétique ne peut exclure les interrogations et les prises de conscience liées aux impacts environnementaux potentiels de l'utilisation de nouveaux matériaux et de nouvelles ressources. Ces impacts futurs peuvent être anticipés à partir d'analyses des impacts environnementaux passés de contaminants clés qui ont été stockés au fil du temps dans des dépôts sédimentaires bien préservés dans les systèmes fluviaux.

### **Analyser des archives sédimentaires en aval des grands bassins versants pour retracer l'histoire de la contamination des fleuves et la confronter à l'histoire des Hommes.**

Les particules sédimentaires piègent et transfèrent une grande diversité de contaminants présents à l'état de traces véhiculés par les fleuves. Lorsque ces particules sédimentaires et les contaminants associés se déposent à plus ou moins long terme dans des zones d'accumulation, elles constituent de précieux témoignages historiques. La recherche et la datation de tels archivages sédimentaires au sein des marges alluviales aux exutoires de sept grands bassins versants français a permis de reconstruire les niveaux de contamination pour trois grandes familles de contaminants : les radionucléides naturels et artificiels, les microplastiques et leurs dérivés et les métaux de haute technologie, en particulier le platine. Ces reconstructions retracent aujourd'hui les trajectoires d'état des milieux (State) depuis le début du siècle dernier jusqu'à nos jours dans la grande majorité des cas. Ces séries temporelles ont été couplées à des frises socio-historiques, élaborées à partir d'archives et autres analyses documentaires renseignant les moteurs de leurs usages (Drivers) et les pressions anthropiques (Pressures). Des analyses mathématiques par Intelligence Artificielle ont été développées afin de modéliser les trajectoires d'état du passé et de proposer des trajectoires prédictives sur la base de scénarios d'usage et de changement climatique.

### **Résultats majeurs du projet**

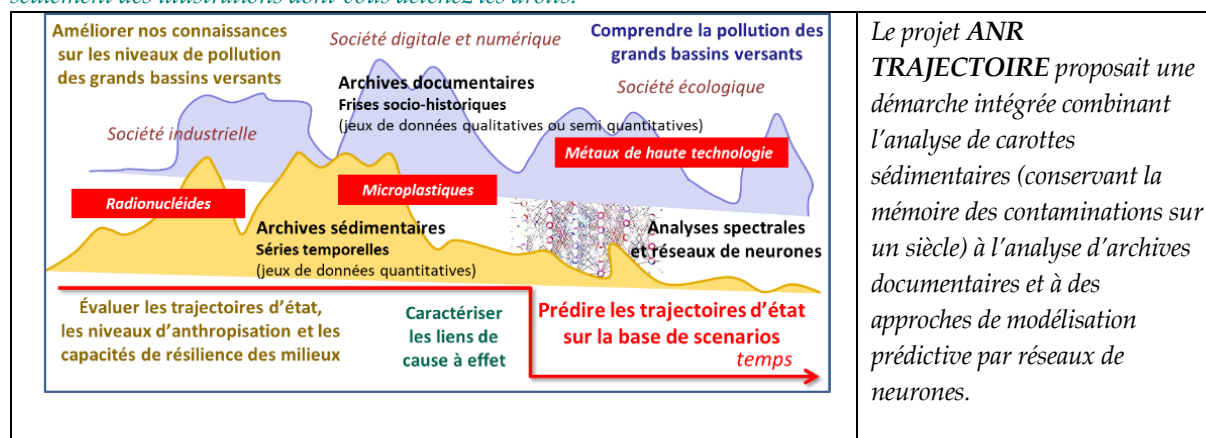
TRAJECTOIRE a produit près de 50 m cumulés d'archives sédimentaires et plus de 500 échantillons datés documentant l'histoire de la contamination des exutoires des bassins versants de la Loire, du Rhône, du Rhin, de la Meuse, de la Moselle, de la Garonne et de la Seine et couvrant, dans la grande majorité des cas, a minima les cent dernières années. Les trajectoires d'état ont été reconstruites pour le  $^{137}\text{Cs}$  et d'autres radionucléides à vie longue ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{40}\text{K}$ , isotopes du plutonium), ainsi que pour les microplastiques et leurs dérivés et pour le platine. Elles permettent de connaître la variabilité des pressions et des expositions selon les territoires et au fil du temps.

### **Production scientifique et brevets depuis le début du projet**

Seize publications scientifiques dans différentes revues scientifiques et près d'une dizaine de communications dans des congrès internationaux regroupent et valorisent aujourd'hui les résultats majeurs du projet.

### **Illustration**

Une illustration avec un schéma, graphique ou photo et une brève légende. L'illustration doit être clairement lisible à une taille d'environ 6cm de large et 5cm de hauteur. Prévoir une résolution suffisante pour l'impression. Envoyer seulement des illustrations dont vous détenez les droits.



### B.3 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

*Suivre impérativement les instructions ci-dessus.*

#### **Contamination Trajectories of French Rivers Over the Past 100 Years**

##### ***Drawing on past experience to better prepare for the future in a context of climate and societal change***

The "Great Acceleration" of industrialization in the mid-20th century likely led, within a context of globalization, to rapid scientific and technological progress, and expanding communication modes, to a sudden intensification of all human-driven processes that alter the environment. This period of acceleration may have resulted in a significant lack of detailed, although not comprehensive, information on the environmental consequences of such development.

In France, environmental monitoring developed gradually and became part of public policy from the 1990s onward. Today, on the onset of the 4th industrial revolution, as humanity seeks to transition away from the intensive exploitation of carbon-based resources, the energy transition must not overlook questions and awareness around the potential environmental impacts of new materials and resources. These future impacts can be anticipated by a posteriori analysis of the environmental consequences of key past contaminants stored over time in well-preserved sedimentary deposits within river systems.

##### ***Analyzing sedimentary archives downstream of major river basins to retrace contamination history and connect it to human history***

Sedimentary particles trap and transport a wide variety of trace contaminants carried by rivers. When these particles and their associated contaminants are deposited over the short or the long term in accumulation zones, they provide valuable historical records. The identification and dating of such sedimentary archives within the alluvial margins at the outlets of seven major French river basins have made it possible to reconstruct contamination levels for three major contaminant families: natural and artificial radionuclides, microplastics and their derivatives, and high-tech metals, particularly platinum. These reconstructions now cover the environmental state trajectories from the early 20th century to the present in the vast majority of cases. These time series were cross-referenced with socio-historical timelines, developed from archival and documentary analysis detailing the drivers of contaminant use and human pressures. Artificial Intelligence-based mathematical analyses were developed to model past environmental state trajectories and propose predictive pathways based on usage and climate change scenarios.

##### ***Key results of the project***

TRAJECTOIRE generated nearly 50 meters of cumulative sediment archives and over 500 dated samples, documenting the contamination history at the outlets of the Loire, Rhône, Rhine, Meuse, Moselle, Garonne, and Seine basins. Environmental state trajectories were reconstructed for  $^{137}\text{Cs}$  and other long-lived radionuclides ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{40}\text{K}$ , plutonium isotopes), as well as for microplastics and their derivatives, and platinum. These findings help shed light on how exposure and pressure have varied over time and across different territories.

##### ***Scientific production and patents since the project began***

Sixteen scientific publications in various academic journals and ten presentations at international conferences currently summarize and promote the project's major findings.

## C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

*Maximum 5 pages. On donne ci-dessous des indications sur le contenu possible du mémoire. Ce mémoire peut être accompagné de rapports annexes plus détaillés.*

*Le mémoire scientifique couvre la totalité de la durée du projet. Il doit présenter une synthèse auto-suffisante rappelant les objectifs, le travail réalisé et les résultats obtenus mis en perspective avec les attentes initiales et l'état de l'art. C'est un document d'un format semblable à celui des articles scientifiques ou des monographies. Il doit refléter le caractère collectif de l'effort fait par les partenaires au cours du projet. Le coordinateur prépare ce rapport sur la base des contributions de tous les partenaires.*

*Un mémoire scientifique signalé comme confidentiel ne sera pas diffusé. Justifier brièvement la raison de la confidentialité demandée. Les mémoires non confidentiels seront susceptibles d'être diffusés par l'ANR, notamment via les archives ouvertes <http://hal.archives-ouvertes.fr>.*

**Mémoire scientifique confidentiel** : non



## C.1 RESUME DU MEMOIRE

*Ce résumé peut être repris du résumé consolidé public.*

Le projet TRAJECTOIRE s'est appuyé sur l'analyse du passé pour anticiper les impacts environnementaux futurs dans un contexte de transition climatique et sociétale. Alors que la surveillance environnementale en France ne s'est structurée qu'à partir des années 1990, le projet a comblé ce manque de données historiques en reconstituant, via l'étude d'archives sédimentaires, les trajectoires de contamination de sept grands fleuves français (Garonne, Loire, Meuse, Moselle, Rhin, Rhône et Seine). Ces sédiments, pièges naturels des contaminants, ont permis de documenter plus d'un siècle d'histoire environnementale.

Environ 50 m de carottes sédimentaires et 500 échantillons datés ont été analysés pour trois familles de polluants : radionucléides ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , isotopes du plutonium...), microplastiques et platine. Les profils temporels de contamination ont été croisés avec des frises socio-historiques retraçant les usages, les pressions anthropiques et les événements industriels. Les résultats révèlent des dynamiques spatio-temporelles contrastées et des capacités de résilience variables selon les bassins.

L'analyse DPSIR, couplée à des outils de modélisation basés sur l'intelligence artificielle, a permis de proposer des trajectoires prédictives en réponse à différents scénarios d'usages futurs et de changement climatique. Le projet a donné lieu à 16 publications scientifiques et de nombreuses communications internationales.

## C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

*Présenter les enjeux initiaux du projet, la problématique formulée par le projet, et l'état de l'art sur lequel il s'appuie. Présenter leurs éventuelles évolutions pendant la durée du projet (les apports propres au projet sont présentés en C.4).*

L'intensification des préoccupations environnementales, conjuguée à l'évolution rapide des technologies industrielles et aux inflexions successives des politiques publiques au cours du XXe siècle, a souvent conduit à une documentation lacunaire quant aux conséquences environnementales à long terme du développement industriel. À l'aube de la quatrième révolution industrielle, dans un contexte de transition énergétique visant à réduire la dépendance aux ressources fossiles, il devient impératif d'intégrer, dans les stratégies de développement durable, une évaluation rigoureuse des impacts associés à l'usage croissant de nouvelles ressources.

Dans cette perspective, les grands fleuves constituent des objets d'étude privilégiés. En tant qu'exutoires naturels des substances d'origine anthropique, ils participent activement au transfert des contaminants au sein des hydrosystèmes. Les sédiments fluviaux, en particulier ceux conservés dans des zones de dépôt pérennes (berges, marges alluviales, plaines d'inondation, retenues de barrage), jouent un rôle d'archives environnementales, en enregistrant les signaux des pressions anthropiques exercées au fil du temps. Ces matrices naturelles offrent ainsi une opportunité unique de reconstituer les trajectoires historiques de contamination, et d'évaluer la résilience des milieux face aux évolutions technologiques, industrielles et réglementaires. L'émergence de substances préoccupantes – telles que les microplastiques, les métaux technologiques rares ou les radionucléides associés à l'usage de l'énergie nucléaire – soulève de nouveaux enjeux scientifiques et sociétaux. Ces contaminants, parfois encore mal caractérisés dans l'environnement, nécessitent une compréhension fine de leurs dynamiques de dispersion, d'accumulation et de persistance. Dès lors, une question centrale se pose : comment modéliser les trajectoires futures de contamination des hydrosystèmes, en s'appuyant sur l'analyse rétrospective des processus passés ? Comment établir des liens de causalité entre l'évolution temporelle des concentrations de contaminants dans les sédiments fluviaux et les pressions anthropiques exercées par le passé, dans le but de prédire les trajectoires environnementales futures et d'anticiper les capacités de résilience des grands hydrosystèmes face à l'émergence de nouvelles substances ?

Au cours des dernières décennies, de nombreuses études ont mis en évidence la pertinence des archives sédimentaires pour reconstituer les dynamiques spatio-temporelles des contaminations anthropiques. Les grands fleuves français – notamment la Garonne, le Rhône, la Loire et la Seine – ont fait l'objet d'investigations approfondies sur les métaux lourds (Zn, Pb, Cd, Cu) et les composés organiques persistants (PCB, HAP), avec des résultats robustes concernant la datation et l'origine des pollutions. Parmi ces initiatives, le programme INTERPOL, lancé en 2017 avec le soutien de l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB) et du réseau LTSER France, a permis de consolider les connaissances sur les contaminants historiques. Dans un contexte d'intensification des usages numériques, de développement des technologies nucléaires, et d'émergence de matériaux critiques, l'étude des substances émergentes, dont les comportements environnementaux (mobilité, biodisponibilité, persistance) demeurent encore mal connus, s'imposaient. Le projet TRAJECTOIRE s'inscrit dans cette dynamique. Il proposait une approche interdisciplinaire et intégrée,

combinant l'analyse géochimique et radiochronologique des archives sédimentaires à l'exploitation des corpus documentaires (archives industrielles, réglementaires, socio-économiques). L'objectif était double : (i) reconstruire les trajectoires historiques des pressions anthropiques à l'échelle des grands bassins versants, et (ii) développer des modèles prédictifs fondés sur l'apprentissage automatique (machine learning) afin d'évaluer la réponse des hydrosystèmes face à des scénarios futurs de pression environnementale.

### C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Le projet a adopté une approche intégrée et interdisciplinaire, mobilisant les géosciences, l'histoire environnementale, l'analyse des politiques publiques et les sciences de la donnée pour étudier les trajectoires spatio-temporelles de contaminants — radionucléides, microplastiques et métaux technologiques rares — au cours du XXe et du début du XXIe siècle (Figure 1). L'investigation reposait sur l'analyse conjointe d'archives sédimentaires prélevées dans les zones d'accumulation situées à l'exutoire des principaux bassins versants français (Garonne, Loire, Meuse, Moselle, Rhin, Rhône et Seine). Un enjeu majeur du projet reposait sur la réussite de la localisation, de la collecte et de la datation de séquences sédimentaires représentatives selon une approche multi-chronomètres (notamment  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{241}\text{Am}$ ) et caractérisées du point de vue géochimique et granulométrique. Cette étape fondamentale franchie, des analyses ont été réalisées afin de déterminer les concentrations massiques de contaminants représentatifs des activités anthropiques contemporaines : radionucléides d'origine naturelle et artificielle ( $^{40}\text{K}$ , descendants des chaînes U/Th, isotopes du plutonium, tritium organiquement lié), microplastiques et leurs additifs (phtalates), ainsi que métaux stratégiques utilisés dans les technologies émergentes (gadolinium, platine). Les jeux de données acquis ont alors été corrélés à un corpus d'archives documentaires et statistiques (données industrielles, commerciales, réglementaires), permettant d'identifier les facteurs historiques, économiques et techno politiques qui structurent les dynamiques d'émission, de dissémination et d'accumulation de ces contaminants. L'approche visait à articuler des logiques de causalité multiples, en intégrant des effets d'inertie, de mémoire environnementale et de transformation des usages. Enfin, la modélisation mettant en œuvre des modèles mécanistiques (fonction de transfert) et basés sur des réseaux de neurones ont proposé d'identifier des relations non-linéaires, de quantifier des effets de latence et de caractériser la persistance des impacts dans les milieux. La finalité de ces modèles ciblait la construction de règles interprétatives susceptibles d'être mobilisées dans des dispositifs de prévision ou de scénarisation prospective.

### C.4 RESULTATS OBTENUS ET EXPLOITATION DES RESULTATS

*Positionner les résultats par rapports aux livrables du projet et aux publications, brevets etc. Revisiter l'état de l'art et les enjeux à la fin du projet.*

**Les résultats ci-dessous, non exhaustifs, retracent les publications produites à ce stade.** Plus de 50 mètres d'archives sédimentaires cumulés ont été extraits dans les zones situées en aval de la Loire, du Rhône, du Rhin, de la Seine, de la Garonne, de la Meuse et de la Moselle choisies pour la continuité de leur dépôt sédimentaire sur plusieurs décennies. Le choix des sites de carottage a été fait à partir de cartes anciennes, de photographies aériennes et d'investigations de terrain, utilisant en particulier des sondages GPR (Ground Penetrating Radar), avec un effort particulier pour sélectionner des zones de dépôt continu sur de longues périodes. L'ensemble des informations associés aux sites étudiés (photographies historiques, cartographies, hydrologie, ...) a été synthétisé sous la forme d'un géo-catalogue numérique partagé. La datation des carottes sédimentaires s'est appuyée sur plusieurs marqueurs chronologiques, principalement les radionucléides  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  et  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  (Foucher et al., 2021), ainsi que sur l'analyse des événements de crue historiques, souvent identifiés par des niveaux (strates) de granulométrie plus grossière caractéristiques. Cette approche a permis d'établir des modèles de sédimentation consolidés (modèles d'âge) à partir desquels les trajectoires des concentrations en contaminants ont pu être retracées a minima sur les cents dernières années dans la très grande majorité des cas au exutoires des sept bassins versants ciblés lors du montage du projet. L'analyse des profils sédimentaires a révélé des fluctuations importantes des taux de sédimentation apparents, influencés par des paramètres variés tels que la fréquence des crues, la couverture végétale dans le chenal et les conditions hydrodynamiques spécifiques des sites (Eyrolle et al., 2024a). Une étude menée sur le Rhin supérieur en lien avec le projet a soutenu l'approche en utilisant plusieurs méthodes géochronologiques ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , OSL) pour dater les sédiments des zones inondables impactées par l'homme. Elle souligne l'importance des cartes et données historiques pour établir des repères temporels précis et montre l'intérêt de combiner ces méthodes pour créer des modèles d'âge robustes dans les environnements fluviiaux anthropisés (Euzen et al., 2024). Concernant les radionucléides, l'analyse des profils de  $^{137}\text{Cs}$

a révélé des concentrations significatives associées aux retombées nucléaires mondiales des essais nucléaires atmosphériques des années 1960, ainsi qu'aux accidents nucléaires majeurs, comme celui de Tchernobyl en 1986. Nos travaux ont notamment permis de montrer des corrélations significatives entre les concentrations observées dans les sédiments et les retombées atmosphériques reconstruites à l'échelle de bassins versants. Ces résultats ont permis de souligner des mécanismes de transfert solides moyens proches (érosion des sols, cascades sédimentaires), à cette échelle, quel que soit le système (Eyrolle et al., 2024a) ont permis de fournir des valeurs clés pour obtenir les paramètres des modèles opérationnels décrivant les transferts de contaminants ( $^{137}\text{Cs}$ ) dans les cours d'eau à la suite de retombées atmosphériques sur les bassins versants français. Les résultats obtenus montrent également que des périodes de contamination additionnelles liées aux rejets industriels de l'industrie du combustible nucléaire, ont masqué certains pics de contamination attribués à Tchernobyl, en particulier ceux réalisés dans le Rhône et le Rhin (CNPE Suisses) ou ceux qui ont conduit à des pics de contamination marqués comme sur la Meuse en 1972 (Eyrolle et al., 2024a). Le tritium sous sa forme organiquement liée a été recherché au sein des archives sédimentaires étudiées. La matière organique aquatique, la seule susceptible d'enregistrer les rejets liquides de tritium des installations nucléaires, n'est pas conservée au sein des archives sédimentaires fluviales (Eyrolle et al., 2019). Aussi, la détection de Tritium Organiquement lié (TOL) trouve d'autres origines. Dans le Rhône, la trajectoire environnementale du tritium utilisé dans l'industrie horlogère franco-suisse entre 1962 et 2008 a été reconstruite (Morereau et al., 2020). Bien que l'usage du tritium ait cessé respectivement en 1992 (France) et en 2008 (Suisse), des concentrations élevées de Tritium organiquement lié (TOL) ont été mesurées dans les sédiments du Rhône, atteignant jusqu'à 10 000 fois les valeurs propres au bruit de fond naturel. Deux carottes sédimentaires, prélevées en amont et en aval du Rhône, ont montré que les pics de contamination datent des années 1980, période d'utilisation maximale de ces composés dans les ateliers d'horlogerie. L'analyse des demi-vies effectives ( $5 \pm 2$  ans) a permis d'estimer la résilience du système fluvial, soit 14 à 70 ans en amont, et 14 à 28 ans en aval. Ces résultats soulignent la capacité variable d'autoépuration du fleuve selon la localisation des sources de contamination et les dynamiques sédimentaires. Les résultats acquis sur le Rhin indiquent que ce fleuve a également été significativement impacté par des rejets de tritium d'origine horlogère. Les autres fleuves, non exposés aux rejets de l'horlogerie, ont enregistré le transfert différé de tritium des retombées atmosphériques globales des essais nucléaires comme cela avait été initialement démontré dans le cas de la Loire (Eyrolle et al., 2019). Ces résultats consolident ainsi grandement les premiers travaux et montrent un processus de dispersion à grande échelle et systématique. L'archive prélevée sur la Seine témoigne toutefois d'apports significatifs autres, masquant partiellement le premier processus, très probablement en lien avec les émissions atmosphériques de tritium par le centre de Valduc (21) au cours de plusieurs décennies. En analysant les signatures en  $\Delta^{14}\text{C}$  du carbone organique particulaire (POC) stocké dans les sédiments de la Loire, en aval des centrales nucléaires, Copard et al. (2022) ont montré que l'empreinte des rejets en  $^{14}\text{C}$  de l'industrie civile nucléaire n'est pas détectable, comme dans le cas du tritium, car le POC aquatique, le seul pouvant bio intégrer le radiocarbone rejeté par les industries (Eyrolle et al. 2022), n'est pas préservé - ou très peu, car très labile face aux différents processus de dégradation, dans les archives sédimentaires. S'agissant des radionucléides naturels, l'analyse des concentrations en  $^{40}\text{K}$  dans les archives sédimentaires étudiées révèle l'empreinte de l'usage des engrais potassiques au XXe siècle. Un pic de  $^{40}\text{K}$  est observé dans les années 1980, en lien avec l'intensification agricole, suivi d'un déclin rapide reflétant une bonne résilience environnementale (Eyrolle et al., 2024b). Par ailleurs, l'analyse isotopique multi-traceurs ( $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ) de l'archive Loire a permis d'identifier des apports anthropiques en radionucléides, notamment ceux liés à deux accidents survenus dans une ancienne centrale nucléaire en 1969 et 1980. Malgré des concentrations très faibles, souvent proches des limites de détection, ces marqueurs fournissent néanmoins un repère temporel utile pour la datation et démontrent l'absence d'impact radiologique significatif de ces événements. En revanche, la traçabilité des activités minières par les isotopes du plomb demeure limitée, en raison de la faible dispersion des matériaux uranifères (Morereau et al., 2022). Concernant les microplastiques et leurs dérivés, les travaux de Phuong et al. (2021), initialement menés sur des sédiments marins, ont souligné que la détection fiable des microplastiques (MPs) dans les sédiments représente un défi analytique majeur en raison de leur faible concentration et de la complexité de la matrice. Cette revue de 70 études, principalement menées en Europe et en Asie, montre une prédominance de certaines méthodes : solution saturée de NaCl pour la séparation,  $\text{H}_2\text{O}_2$  pour la digestion, et FTIR pour l'identification. Malgré ces tendances, l'absence de protocoles standardisés limite la comparabilité des résultats d'un site à l'autre. Les auteurs recommandent ainsi une harmonisation des méthodes, l'adaptation des filtres aux techniques analytiques, et le recours à l'automatisation pour limiter les biais. Dans la continuité de ces travaux, Ourgaud et al. (2022) ont optimisé l'analyse des microplastiques par spectroscopie LDIR.



L'étude démontrait alors une quantification fiable (80–100 % de récupération) de 11 polymères dans diverses matrices (eau, sédiment, biote), avec un temps d'analyse réduit (3–6 h). Les résultats ont révélé la prédominance de PVC dans les sédiments/poissons, et de PE/PP (Polyéthylène/Polypropylène) dans l'eau/moules. Les résultats de microplastiques dans les archives TRAJECTOIRE ne sont actuellement pas publiés. Toutefois, l'analyse des dérivés plastiques (Phthalate esters (PAEs) et Organophosphate esters (OPEs)) dans les archives de la Loire, de la Meuse, de la Moselle, du Rhône et du Rhin montrent que les concentrations ont augmenté après les années 1950-1970, avec des variations selon les rivières. Des corrélations des paramètres géochimiques propre à la matière organique et les concentrations de contaminants ont été observées, surtout dans la Loire et la Moselle (Vidal et al., 2024 a ; b). Dans la famille des métaux, une revue critique de Schafer et al. (2022) a montré que, dans le bassin versant de la Gironde, la résilience vis-à-vis des contaminants historiques (Cd, Zn, Pb, Cu) dépend de la gestion des résidus miniers et des sédiments contaminés. L'analyse souligne les défis de la gestion des sédiments, avec des actions à la source parfois limitées et un manque de coordination entre l'amont et l'aval. Concernant les contaminants métalliques émergents, liés à de nouvelles sources, l'étude indique des tendances distinctes en particulier avec l'augmentation des activités minières. Les investigations analytiques menées dans le cas du projet TRAJECTOIRE se sont portées sur le gadolinium, puis le platine car celui-ci est plus facilement piégé par les particules solides. Les concentrations de platine (Pt) dans les sédiments des fleuves Loire et Rhône ont augmenté depuis les années 2000, atteignant plus de  $2,5 \mu\text{g kg}^{-1}$ , en raison de l'utilisation des catalyseurs automobiles, représentant plus de 50 % de la demande européenne en Pt depuis les années 1990. En revanche, dans la Seine, les concentrations de Pt sont plus élevées et variables (jusqu'à  $14,6 \mu\text{g kg}^{-1}$ ), probablement en lien avec des sources historiques comme l'utilisation de catalyseurs Pt dans le raffinage du pétrole depuis les années 1940, le traitement du charbon et le raffinage des métaux précieux. Cette étude a permis de distinguer les signaux issus de différentes sources naturelles et anthropiques de Pt dans les sédiments (Chastanet et al., 2024). Un modèle d'intelligence artificielle, le HRHN (Hierarchical Attention-Based Recurrent Highway Networks), a été conçu pour prédire les concentrations de polluants dans les rivières, en particulier le césium-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) et le potassium-40 ( $^{40}\text{K}$ ), deux radionucléides d'origine anthropique ou naturelle. Ce modèle repose sur une architecture de réseaux de neurones récurrents intégrant des mécanismes d'attention hiérarchique et de « highway layers », ce qui lui confère une capacité à modéliser des séries temporelles complexes. Il est entraîné à l'aide d'une technique d'augmentation des données permettant d'optimiser l'apprentissage sur des jeux de données hétérogènes et parfois incomplets (Lepage et al., 2022 ; Pele et al., 2024). Pour le  $^{137}\text{Cs}$ , les variables explicatives incluent le débit minimal cumulé, le lessivage, les dépôts atmosphériques, l'inventaire des sols et les rejets nucléaires. Le modèle a obtenu des performances satisfaisantes sur plusieurs grands fleuves français : Rhône (RMSE de 32,1 Bq/kg), Seine (22,8), Loire (30,5), Meuse (20,2) et Moselle (17,5). En revanche, les résultats sont moins bons sur le Rhin (93 Bq/kg), en partie à cause du manque de données sur les rejets d'origine suisse. L'analyse de sensibilité par la méthode ALE (Accumulated Local Effect) permet d'interpréter l'influence locale des variables d'entrée. Par exemple, les dépôts atmosphériques dominent lors des essais nucléaires aériens ; le lessivage est prépondérant en 1986, reflétant les précipitations post-Tchernobyl ; l'inventaire des sols représente une mémoire du système ; le débit module les effets des autres variables ; enfin, l'impact des rejets industriels n'est détectable que lorsque les données sont précises et localisées. Des projections jusqu'en 2100 ont été réalisées sur le Rhône, en explorant divers scénarios : rejets extrêmes, reproduction des événements historiques, effets du changement climatique via une baisse progressive du débit (projections INRAE). Ces simulations montrent que la diminution du débit accentue les concentrations de  $^{137}\text{Cs}$ , quel que soit le scénario. Pour le  $^{40}\text{K}$ , les variables explicatives sont le débit, les précipitations, la température minimale et les apports d'engrais potassiques par bassin versant. Les performances sont bonnes pour la Loire, le Rhin et la Meuse, mais plus limitées pour la Moselle, la Seine et le Rhône. L'ALE révèle que les engrais ne suffisent pas à expliquer les concentrations, probablement du fait d'apports géologiques naturels non inclus dans le modèle. Ces résultats confirment que HRHN est un outil prometteur pour la modélisation environnementale, capable d'offrir à la fois des prédictions robustes et une lecture interprétable des dynamiques polluantes sur le long terme. (Lepage et al., 2022 ; Pele et al., 2024).

## C.5 DISCUSSION

*Discussion sur le degré de réalisation des objectifs initiaux, les verrous restant à franchir, les ruptures, les élargissements possibles, les perspectives ouvertes par le projet, l'impact scientifique, industriel ou sociétal des résultats.*

Le projet TRAJECTOIRE s'est attaché à reconstituer l'évolution des contaminations dans les grands fleuves français au cours du dernier siècle, à partir de plus de 50 m de carottes sédimentaires prélevées dans les bassins de la Loire, du Rhône, du Rhin, de la Seine, de la Garonne, de la Meuse et de la Moselle. Ces sites ont été sélectionnés en raison de la continuité de dépôt sédimentaire, identifiée grâce à des cartes historiques, des photographies aériennes, des sondages GPR et des études de terrain et constituent aujourd'hui des objets d'études identifiés pour la communauté scientifique. La datation des sédiments basée sur l'analyse de radionucléides ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{210}\text{Pbxs}$ ), couplée à l'identification de crues historiques, a permis d'établir des modèles d'âge robustes sur lesquels la communauté peut désormais également s'appuyer. Les échantillons produits sont également archivés et alimentent une échantillothèque précieuse ouverte également à la communauté des sciences environnementales. L'analyse géochimique a mis en évidence des variations importantes des taux de sédimentation, influencées par des facteurs hydrodynamiques, climatiques et anthropiques, renseignant potentiellement les dynamiques sédimentaires des milieux au cours du temps. L'approche méthodologique a conduit à une inter comparabilité certaine des archives et des trajectoires produites malgré l'échelle spatiale couverte et la diversité des bassins versants étudiés. TRAJECTOIRE a, en ce sens, atteint l'un de ses objectifs fondamentaux. Nous avons établi que les archives sédimentaires fluviales constituent des enregistrements chronologiques clés du matériel détritique témoins des apports des bassins versants et des contaminants réactifs aux particules solides en transit dans les fleuves. En revanche, la matière organique aquatique (en particulier les algues et le phytoplancton), très faiblement conservée dans ces archives, ne permet pas de retracer les contaminants associés à ces matériaux. Ce pompage biologique des contaminants, initié par la production primaire (par exemple bloom phytoplanctonique) serait donc à rechercher et à évaluer en suivant une autre démarche qui reste à déterminer. Ces processus représentent en effet des verrous émergents dans le cadre du changement climatique se manifestant pour les rivières par une augmentation de la température des cours d'eau et des sécheresses hydrologiques ; des forçages favorables au développement algal. Dans ce contexte, les profils en radionucléides artificiels ont révélé l'empreinte des essais nucléaires atmosphériques et de la catastrophe de Tchernobyl, ainsi que les signaux des rejets industriels dans les différents fleuves. Ces données ont permis de retracer les trajectoires historiques des radionucléides à durée de vie moyenne et longue pour les grands fleuves français tout en renseignant les paramètres des modèles de transfert des radionucléides en rivière en fonction des sources de contamination (apports bassin versant/rejets industriels), notamment pour le  $^{137}\text{Cs}$ . Ce dernier constat constitue un apport opérationnel majeur du projet. Peu de données historiques étaient disponibles pour le tritium organiquement lié (TOL), en particulier dans les sédiments des rivières. Du TOL issu des activités horlogères franco-suisse a été retrouvé dans les sédiments du Rhône, ce qui était connu, mais aussi à des niveaux encore plus élevés dans ceux du Rhin. Ce dernier point n'était pas soupçonné. Les pics, culminants dans les années 1980, témoignent de l'évolution des usages des peintures tritiées dans les ateliers d'horlogerie implantés à plusieurs centaines de km en amont des sites d'enregistrement. La faible atténuation du signal jusqu'aux années les plus récentes suggère une faible capacité de résilience du système vis-à-vis de cette contamination. En revanche, la limitation des usages de fertilisants potassiques en agriculture s'est traduite par une réponse quasiment immédiate des milieux. Aussi, l'empreinte de l'agriculture, visible à travers un pic de potassium naturel dans les années 1980 dans les sédiments de la quasi-totalité des bassins versants étudiés, s'est rapidement atténuée vers les valeurs de référence au cours des années suivantes. Concernant les polluants plastiques, nos travaux ont souligné la difficulté de quantifier les microplastiques dans les sédiments en raison de leur faible concentration et de la complexité des matrices. Les résultats acquis sur l'archive Loire seront prochainement comparés à ceux produits dans le cadre de l'ANR SEDIPLAST (2020-2025) sur le même site d'archivage sédimentaire. Ce rapprochement permettra de conforter l'ensemble des résultats acquis sur ces contaminants dans le cadre des deux projets et de consolider la robustesse des différentes approches méthodologiques. Les trajectoires historiques des dérivés des microplastiques (PAEs, OPEs) étaient très peu documentées, en particulier en France. Les résultats ont montré une augmentation marquée à partir des années 1950-1970, en lien avec les usages des plastiques. Des corrélations entre les concentrations de ces composés et les paramètres dérivés de la matière organique ont été identifiées dans plusieurs archives. Ces résultats sont originaux et soulignent toute l'importance de mesurer ces paramètres influant dans le cas des contaminants organiques hydrophobes. L'étude des trajectoires des métaux critiques initialement orientée vers le gadolinium a finalement été ciblée sur le platine, le premier élément étant principalement émis et transféré sous forme dissoute. Le platine, utilisé dans les catalyseurs automobiles, présente des hausses depuis les années 2000, avec des niveaux particulièrement élevés dans la Seine, en lien avec des sources historiques. Ces résultats sont également particulièrement novateurs. Pour l'ensemble des contaminants étudiés, les recherches documentaires, la construction des frises socio-historiques et les approches DPSIR (Drivers, Pressures, State, Impact, Response) ont été consolidées et

particulièrement éclairantes. Elles ont permis de renseigner les sources historiques et de contextualiser les observations. Ces analyses ont traduit l'état des milieux et soutenu la compréhension des trajectoires enregistrées. Enfin, des modèles d'intelligence artificielle (HRHN) ont été testés pour prédire les concentrations de  $^{137}\text{Cs}$ . Les performances ont été très bonnes pour le Rhône, plus modestes pour la Loire, soulignant néanmoins la pertinence de ces approches pour la surveillance environnementale. Cette approche a toutefois trouvé ses limites dans le cas des microplastiques, de leurs dérivés et du platine en raison des jeux de données encore trop restreints produits dans le cadre du projet pour ce type d'analyse numérique. L'ensemble de ces résultats illustre la richesse des archives sédimentaires comme témoins des activités humaines, ainsi que la complexité des dynamiques de transfert des contaminants dans les milieux fluviaux.

## C.6 CONCLUSIONS

Le projet TRAJECTOIRE a permis de reconstituer l'évolution spatio-temporelle des contaminations sédimentaires dans les principaux bassins fluviaux français sur plus d'un siècle. En s'appuyant sur une approche pluridisciplinaire associant géochronologie, analyses géochimiques, historiques et modélisation, il a confirmé le rôle fondamental des archives sédimentaires pour reconstruire les apports anthropiques et les dynamiques environnementales à l'échelle des bassins versants. L'intégration d'une grande diversité de contaminants – radionucléides, métaux, microplastiques et dérivés – a mis en évidence la complexité des processus de transfert et de rétention dans les systèmes fluviaux, ainsi que la variabilité de leur résilience selon la nature des substances et les pressions anthropiques. Le projet a notamment démontré l'intérêt de coupler données historiques, analyses isotopiques et intelligence artificielle pour affiner les modèles prédictifs de contamination, tout en soulignant les limites actuelles de l'approche qui ont été attribuées à l'hétérogénéité et à la rareté de certaines données, notamment pour les contaminants émergents. En cela, TRAJECTOIRE constitue une avancée majeure pour la compréhension des trajectoires environnementales de contaminants, tout en ouvrant la voie à de nouvelles perspectives en matière de gestion des risques, de surveillance environnementale et de recherche sur les réponses des écosystèmes fluviaux face aux changements globaux.

## C.7 REFERENCES

- Chastanet M., Debret M., Gardes T., Schäfer J., Abdou M., Lestel L., Morereau A., Mourier B., Grosbois C., Eyrolle F., Coynel A. (2024) Contrasting platinum trajectories in three major French rivers using 2 dated sediment cores (1910-2021): From geochemical baseline to 3 emerging source signals. *STOTEN*, 931, 172937.
- Copard Y., Eyrolle F., Grosbois C., Lepage H., Ducros L., Morereau A., Bodereau N., Cossonnet C., Desmet, M. (2022) The unravelling of radiocarbon composition of organic carbon in river sediments to document past anthropogenic impacts on river systems, *Science of The Total Environment*, vol. 806, p. 150890
- Evrard O., Batista P.V.G., Company J., Dabrin A., Foucher A., Franckl A., Garcia-Comendador J., Huguet A., Lake N., Lizaga I., Martinez-Carreras N., Navrati O., Pignol C., Sellier V. (2022) Improving the design and implementation of sediment fingerprinting studies: summary and outcomes of the TRACING 2021 Scientific School. *J Soils Sediments* 22, 1648-1661. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-032031>
- Eyrolle F., Copard Y., Lepage H., Ducros L., Morereau A., Grosbois C., Cossonnet C. Gurriaran R., Booth S., Desmet, M. (2019) Evidence for tritium persistence as organically bound forms in river sediments since the past nuclear weapon tests, *Scientific reports*, 9, 11487.
- Eyrolle F., Radakovitch O., Lepage H., Raimbault P., Copard Y., Bodereau N., Le Corre C., Cossonnet C. (2022)  $^{14}\text{C}$  and OBT dependencies upon Particulate Organic Matter origin and nature - Focus on the nuclearized Rhone River (France), *Journal of Soils and Sediments*, <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03227-7>
- Eyrolle F., Boyer P., Chaboche P. A., De Vismes A., Lepage H., Seignemartin G. et al., Evrard O. (2024a) Temporal trajectories of artificial radiocaesium  $^{137}\text{Cs}$  in French rivers over the nuclear era reconstructed from sediment cores, *Scientific reports*, 14, 14213. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64505-7>.
- Eyrolle F., Morereau A., Zebracki M., Nicoulaud Gouin V., Lepage H., Zebracki M., De Vismes A., Meyer A., Montarges-Pelletier E., Chabaux F., Coynel A., Debret M., Giner F., Grosbois C., Gurriaran R., Mourier D., Lestel L. (2024b) Anthropogenic legacy of potassium-40 in French large rivers reconstructed from sediment cores, *STOTEN*, 954, 176479, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176479>
- Euzen C., Chabaux F., Rixhon G., Preusser F., Eyrolle F., Chardon V., Zander A. M., Badariotti D., Schmitt L. (2024)

- Multi-method geochronological approach to reconstruct post-1800 floodplain sedimentation in the Upper Rhine Plain, France, *Quaternary Geochronology*, 83, 101561, <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2024.101561>.
- Foucher, A., Chaboche, P.-A., Sabatier, P., Evrard, O. (2021) A worldwide meta-analysis (1977–2020) of sediment core dating using fallout radionuclides including  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$ s, *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 4951–4966, <https://doi.org/10.5194/essd-13-4951-2021>, 2021.
- Lepage H., Nicoulaud-Gouin V., Pele K., Boyer P. (2023) Use of machine learning and deep learning to predict particulate  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in a nuclearized river, *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 270, 107294. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X2300187X?dgcid=author>
- Morereau A., H. Lepage, D. Claval, C. Cossonnet, J.P. Ambrosi, B. Mourier, T. Winiarski, Y. Copard, F. Eyrolle (2020) Trajectories of technogenic tritium in the Rhône River (France), *Journal of Environmental Radioactivity*, 223–224, 106370.
- Morereau A., Jaegler H., Hain K., Steier P., Golser R., Beaumais A., Lepage H., Eyrolle F., Grosbois C., Cazala C., Gourgiotis A. (2022) Deciphering sources of U contamination using isotope signatures in the Loire River sediments: exploring the relevance of the  $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$  ratio, *Chemosphere*, 307, 135658.
- Ourgaud M., Phuong N. N., Papillon L., Brach-Papa C., Galgani, F., Fauvelle V., Panagiotopoulos C., Sempéré R. (2022) Identification and quantification of microplastics in the marine environment using Laser Direct Infra-Red (LDIR). *Env. Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c0887>
- Pele K., Lepage H., Nicoulaud-Gouin V., Eyrolle F., Using neural network to reconstruct legacy contamination: application to cesium-137, 2025, in prep.
- Phuong N. N., Fauvelle V., Grenz C., Ourgaud M., Schmidt N., Strady E., Sempéré R. (2021) Review - Highlights from a review of microplastics in marine sediments, *Science of the Total Environment* 777, 146225.
- Schäfer J., Coynel A., Blanc G. (2022) Impact of metallurgy tailings in a major European fluvial-estuarine system: Trajectories and resilience over seven decades. Invited contribution. *Science of the Total Environment*. 805: 150195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150195>
- Vidal A., Papillon L., SeigneMartin G., Morereau A., Euzèn C., Grenz C., Copard Y., Eyrolle F., Sempéré R. (2024) Temporal evolution of plastic additive contents over the last decades in two major European rivers (Rhône and Rhine) from sediment cores analyses, *Environmental Pollution*, 348, 123655 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123655>
- Vidal A., Seignemartin G., Copard Y., Montargès-Pelletier E., Ollive V., Papillon L., Grenz C., Eyrolle F., Sempéré R. (2024) Temporal trend of plastic additive contents in sediments cores of three French rivers (Loire, Meuse and Moselle) over the last decades, *Science of the Total Environment* 931, 172849.

## D LISTE DES LIVRABLES

Quand le projet en comporte, reproduire ici le tableau des livrables fourni au début du projet. Mentionner l'ensemble des livrables, y compris les éventuels livrables abandonnés, et ceux non prévus dans la liste initiale.

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
06/07/2020	1	Plan de gestion des données à 6 mois	Rapport	IRSN, MIO, EPOC, METIS, M2C, LSCE, LEHNA	-
06/01/2022	2	Rapport intermédiaire à 18 mois	Rapport	IRSN, MIO, EPOC, METIS, M2C, LSCE, LEHNA	-
06/07/2022	3	Plan de gestion des données à 24 mois	Rapport	IRSN, MIO, EPOC, METIS, M2C, LSCE, LEHNA	-

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
06/07/2023	4	Rapport intermédiaire à 36 mois	Rapport	<u>IRSN</u> , MIO, EPOC, METIS, M2C, LSCE, LEHNA	-
05/07/2025	5	Plan de gestion des données final	Rapport	<u>ASNR</u> , MIO, EPOC, METIS, M2C, LSCE, LEHNA	-
05/07/2025	6	Rapport final	Rapport	<u>ASNR</u> , MIO, EPOC, METIS, M2C, LSCE, LEHNA	-

## E IMPACT DU PROJET

Ce rapport rassemble des éléments nécessaires au bilan du projet et plus globalement permettant d'apprécier l'impact du programme à différents niveaux.

### E.1 INDICATEURS D'IMPACT

#### **Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)**

Comptabiliser séparément les actions monopartenaires, impliquant un seul partenaire, et les actions multipartenaires résultant d'un travail en commun.

**Attention :** éviter une inflation artificielle des publications, mentionner uniquement celles qui résultent directement du projet (postérieures à son démarrage, et qui citent le soutien de l'ANR et la référence du projet).

		Publications multipartenaires	Publications monopartenaires
<b>International</b>	Revue à comité de lecture	8	7
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	-	-
	Communications (conférence)	7	1
<b>France</b>	Revue à comité de lecture	-	-
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	-	-
	Communications (conférence)	5	-
<b>Actions de diffusion</b>	Articles vulgarisation	-	5
	Conférences vulgarisation	-	1
	Autres	-	-

#### **Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)**

Ce tableau dénombre et liste les brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet, du savoir faire, des retombées diverses en précisant les partenariats éventuels. Voir en particulier celles annoncées dans l'annexe technique).

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
<b>Brevets internationaux obtenus</b>	



<b>Brevet internationaux en cours d'obtention</b>	
<b>Brevets nationaux obtenus</b>	
<b>Brevet nationaux en cours d'obtention</b>	
<b>Licences d'exploitation (obtention / cession)</b>	
<b>Créations d'entreprises ou essaimage</b>	
<b>Nouveaux projets collaboratifs</b>	ANR CICERON (AAP 2024), OSR7 (Observatoire des sédiments du Rhône), MITI BIOTRACE (AAP 2024), NEEDS TRITON (2024-2026),
<b>Colloques scientifiques</b>	Séminaire interne IRSN, juin 2024
<b>Autres (préciser)</b>	Des résultats du projet ont été obtenus grâce aux collaborations de : L'Université de Strasbourg : Laboratoire d'HYdrologie et de GÉochimie de Strasbourg LHyGeS, UMR 7517, École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST), Laboratoire Image Ville Environnement LIVE, UMR 7362, Faculté de Géographie et d'Aménagement ; et l'OHM Fessenheim pour l'étude du fleuve RHIN ; TRAJECTOIRE RHIN ; L'Université de Lorraine : Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux, UMR 7360 CNRS, LIEC et Laboratoire LOTERR, Département de Géographie ; pour l'étude du fleuve MOSELLE ; TRAJECTOIRE MOSELLE ; Le SCK CEN (Belgian Nuclear Research Centre) : pour l'étude du fleuve Meuse ; TRAJECTOIRE MEUSE

## E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Répertorier les publications résultant des travaux effectués dans le cadre du projet. On suivra les catégories du premier tableau de la section en suivant les normes éditoriales habituelles. En ce qui concerne les conférences, on spécifiera les conférences invitées.

### Publications dans des revues à comité de lecture

- Chastanet M., Debret M., Gardes T., Schäfer J., Abdou M., Lestel L., Morereau A., Mourier B., Grosbois C., Eyrolle F., Coynel A. (2024) Contrasting platinum trajectories in three major French rivers using 2 dated sediment cores (1910-2021): From geochemical baseline to 3 emerging source signals. STOTEN, 931, 172937.
- Copard Y., Eyrolle F., Grosbois C., Lepage H., Ducros L., Morereau A., Bodereau N., Cossonnet C., Desmet, M. (2022) The unravelling of radiocarbon composition of organic carbon in river sediments to document past anthropogenic impacts on river systems, Science of The Total Environment, vol. 806, p. 150890
- Evrard O., Batista P.V.G., Company J., Dabrin A., Foucher A., Franckl A., Garcia-Comendador J., Huguet A., Lake N., Lizaga I., Martinez-Carreras N., Navrátil O., Pignol C., Sellier V. (2022) Improving the design and implementation of sediment fingerprinting studies: summary and outcomes of the TRACING 2021 Scientific School. J Soils Sediments 22, 1648-1661. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03203-1>
- Eyrolle F., Copard Y., Lepage H., Ducros L., Morereau A., Grosbois C., Cossonnet C., Gurriaran R., Booth S., Desmet, M. (2019) Evidence for tritium persistence as organically bound forms in river sediments since the past nuclear weapon tests, Scientific reports, 9, 11487.
- Eyrolle F., Radakovitch O., Lepage H., Raimbault P., Copard Y., Bodereau N., Le Corre C., Cossonnet C. (2022) 14C and OBT dependencies upon Particulate Organic Matter origin and nature - Focus on the nuclearized Rhone River (France), Journal of Soils and Sediments, <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03227-7>
- Eyrolle F., Boyer P., Chaboche P. A., De Vismes A., Lepage H., Seignemartin G. et al., Evrard O. (2024a) Temporal trajectories of artificial radiocaesium 137Cs in French rivers over the nuclear era reconstructed from sediment cores, Scientific reports, 14, 14213. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64505-7>.
- Eyrolle F., Morereau A., Zebracki M., Nicoulaud Gouin V., Lepage H., Zebracki M., De Vismes A., Meyer A., Montarges-Pelletier E., Chabaux F., Coynel A., Debret M., Giner F., Grosbois C., Gurriaran R., Mourier D., Lestel

- L. (2024b) Anthropogenic legacy of potassium-40 in French large rivers reconstructed from sediment cores, *STOTEN*, 954, 176479, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176479>
- Euzen C., Chabaux F., Rixhon G., Preusser F., Eyrolle F., Chardon V., Zander A. M., Badariotti D., Schmitt L. (2024) Multi-method geochronological approach to reconstruct post-1800 floodplain sedimentation in the Upper Rhine Plain, France, *Quaternary Geochronology*, 83, 101561, <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2024.101561>.
- Foucher, A., Chaboche, P.-A., Sabatier, P., Evrard, O. (2021) A worldwide meta-analysis (1977–2020) of sediment core dating using fallout radionuclides including  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$ s, *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 4951–4966, <https://doi.org/10.5194/essd-13-4951-2021>, 2021.
- Lepage H., Nicoulaud-Gouin V., Pele K., Boyer P. (2023) Use of machine learning and deep learning to predict particulate  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in a nuclearized river, *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 270, 107294. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X2300187X?dgcid=author>
- Morereau A., H. Lepage, D. Claval, C. Cossonnet, J.P. Ambrosi, B. Mourier, T. Winiarski, Y. Copard, F. Eyrolle (2020) Trajectories of technogenic tritium in the Rhône River (France), *Journal of Environmental Radioactivity*, 223–224, 106370.
- Morereau A., Jaegler H., Hain K., Steier P., Golser R., Beaumais A., Lepage H., Eyrolle F., Grosbois C., Cazala C., Gourgiotis A. (2022) Deciphering sources of U contamination using isotope signatures in the Loire River sediments: exploring the relevance of the  $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$  ratio, *Chemosphere*, 307, 135658.
- Ourgaud M., Phuong N. N., Papillon L., Brach-Papa C., Galgani, F., Fauvelle V., Panagiotopoulos C., Sempéré R. (2022) Identification and quantification of microplastics in the marine environment using Laser Direct Infra-Red (LDIR). *Env. Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c0887>
- Phuong N. N., Fauvelle V., Grenz C., Ourgaud M., Schmidt N., Strady E., Sempéré R. (2021) Review - Highlights from a review of microplastics in marine sediments, *Science of the Total Environment* 777, 146225.
- Schäfer J., Coynel A., Blanc G. (2022) Impact of metallurgy tailings in a major European fluvial-estuarine system: Trajectories and resilience over seven decades. Invited contribution. *Science of the Total Environment*. 805: 150195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150195>
- Vidal A., Papillon L., SeigneMartin G., Morereau A., Euzèn C., Grenz C., Copard Y., Eyrolle F., Sempéré R. (2024) Temporal evolution of plastic additive contents over the last decades in two major European rivers (Rhône and Rhine) from sediment cores analyses, *Environmental Pollution*, 348, 123655 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123655>
- Vidal A., Seignemartin G., Copard Y., Montargès-Pelletier E., Ollive V., Papillon L., Grenz C., Eyrolle F., Sempéré R. (2024) Temporal trend of plastic additive contents in sediments cores of three French rivers (Loire, Meuse and Moselle) over the last decades, *Science of the Total Environment* 931, 172849.

### Congrès internationaux

- Bodereau N., Eyrolle F., Copard Y. (2022) Nuclear industry releases play a role in the riverine  $^{14}\text{C}$  cycle, in: ICRER, 4-9 September 2022, Oslo, Norway.
- Eyrolle F., Copard Y., Evrard O., Lepage H., Lestel L., Mourier B., Schafer J., Sempéré R. (2022) The memory of riverine sediments used to predict the environmental impact of new technologies, 4th International Conference Integrative Sciences and sustainable development of rivers, 4-5 July 2022, Lyon, France.
- Gardes, T., Coynel, A., Debret, M., Copard, Y., Bossy, C., Chastanet, M., Lepage, H., Montargès-Pelletier, E., Dendievel, A-M., Mourier, B., Winiarski, T., Schäfer, J., Grosbois, C., Eyrolle, F. (2022) Trajectories of legacy and emerging metal contaminants in French river sediments. *Goldschmidt*, 10-15 July 2022, Honolulu, HI, USA. <https://doi.org/10.46427/gold2022.11839>
- Evrard, O., et al. (2023) A review of worldwide sediment core dating research including fallout radionuclides to reconstruct erosion and sedimentation processes. Session H-CG22 “Earth surface processes related to deposition, erosion and sediment transport”. Japan Geoscience Union Meeting 2023 (Chiba, Japan). 21-26 mai 2023.
- Euzen C., Schmitt L., Rixhon G., Preusser F., Eyrolle F., Perrone T., Badariotti D., Chabaux F. (2023) Reconstructing a river temporal trajectory through the metal composition of floodplain fine sediments (Upper Rhine), *Goldschmidt Conference 2023*, 9-14 juillet (Lyon).

- Chastanet M., Debret M., Gardes T., Schäfer J., Abdou M., Lestel L., Morereau A., Grosbois C., Eyrolle F., Coynel A. (2023) *Platinum trajectories in two major French rivers using dated sediment cores (1930-2021): From geochemical baseline to emerging source signals*, Goldschmidt Conference 2023, 9-14 Juillet (Lyon).
- Boyer P., Nicoulaud-Gouin V., Chaboche P., Evrard O., Fouladirad M., Anselmet F., Richard T., Giner F., Mourier D., Eyrolle F. (2024) *Deciphering sources of  $^{137}\text{Cs}$  in French rivers over the nuclear era by Bayesian inference of a watershed erosion model from sediments core datasets*, 6th International Conference on Radioecology & Environmental Radioactivity, Marseille, France, 24-29 November 2024.
- Zebracki M., Seignemartin G., De Vismes-Ott A., Montarges-Pelletier E., Meyer A., Coynel A., Gréau C., Eyrolle F. (2024) *Spatial and temporal analysis of the sedimentary record of  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  series in seven major French rivers: the role of geology and NORM occurrence*, 6th International Conference on Radioecology & Environmental Radioactivity, Marseille, France, 24-29 November 2024.

### Congrès nationaux

- Chastanet M., Debret M., Gardes T., Schäfer J., Abdou M., Lestel L., Morereau A., Grosbois C., Mourier B., Eyrolle F. and Coynel A., 2023, *Trajectoires de contamination en platine dans des carottes sédimentaires (1930-2021) de trois fleuves français : de la ligne de base géochimique aux signaux de sources émergentes*, RST Rennes, France, 30 octobre – 3 novembre 2023.
- Eyrolle F., Nicoulaud-Gouin V., Hugo L., Boyer P., Gurriaran R., Chaboche P.A., EVRARD O., 2025, *Quand les sédiments des rivières nous racontent l'histoire de l'Ere nucléaire en France*, ANR TRAJECTOIRE (2020-2025), Congrès national de Radioprotection – SFRP 2025, 17-19 juin 2025, La Baule, France.
- Boyer P., Richard T., Nicoulaud V., Fouladirad M., AnselmeT F., Eyrolle F., 2025, *Modélisation des contributions des retombées atmosphériques et des rejets des installations à la contamination des rivières depuis les années 60*, Congrès national de Radioprotection – SFRP 2025, 17-19 juin 2025, La Baule, France.
- Nicoulaud-Gouin V., Taha Hamadene T., Eyrolle F., Lepage H., Pelé K., 2025, *L'intelligence artificielle au service de la radioprotection de l'environnement*, Congrès national de Radioprotection – SFRP 2025, 17-19 juin 2025, La Baule, France.
- Eyrolle F., Chaboche P.A., Nicoulaud-Gouin V., Boyer P., Gurriaran R., EVRARD O., 2025, *Quand les archives sédimentaires retracent l'histoire du nucléaire en France*, 29e édition de la Réunion des Sciences de la Terre, 27-31 octobre 2025, Montpellier, France.

### Articles de vulgarisation

- Mesure du tritium horloger dans les sédiments du Rhône, *Le Mag* n°7, Rubrique Terre d'Experts, Septembre 2021, p13.
- Pollution du Rhône au tritium, vers des pistes d'amélioration ? (projet trajectoire), *Repères* n°47, Rubrique Temps forts, novembre 2020, p5. *Repères* n°47 - Novembre 2020 (irsn.fr)
- Trajectoire : lire l'histoire des hommes dans les sédiments. *Le Mag* n°2, Rubrique Terre d'Experts, Juin 2020, p 8.
- ANR Trajectoire 2020-2024, 4ème réunion du consortium au MIO, les 2 et 3 novembre 2021 | Institut Méditerranéen d'Océanologie (osupytheas.fr) <https://www.mio.osupytheas.fr/fr/anr-trajectoire-2020-2024-4eme-reunion-du-consortium-au-mio-les-2-et-3-novembre-2021>
- <https://www.pourlascience.fr/sr/article-partenaire/reveler-la-memoire-enfouie-dans-les-sediments-24118.php>;

## E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

La liste des éléments de valorisation inventorie les retombées (autres que les publications) décomptées dans le deuxième tableau de la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable..** On détaillera notamment :

- brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet.
- logiciels et tout autre prototype
- actions de normalisation

- *lancement de produit ou service, nouveau projet, contrat,...*
- *le développement d'un nouveau partenariat,*
- *la création d'une plate-forme à la disposition d'une communauté*
- *création d'entreprise, essaimage, levées de fonds*
- *autres (ouverture internationale,...)*

*Elle en précise les partenariats éventuels. Dans le cas où des livrables ont été spécifiés dans l'annexe technique, on présentera ici un bilan de leur fourniture.*

## E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé. Renseigner une ligne par personne embauchée sur le projet quand l'embauche a été financée partiellement ou en totalité par l'aide de l'ANR et quand la contribution au projet a été d'une durée au moins égale à 3 mois, tous contrats confondus, l'aide de l'ANR pouvant ne représenter qu'une partie de la rémunération de la personne sur la durée de sa participation au projet.

Les stagiaires bénéficiant d'une convention de stage avec un établissement d'enseignement ne doivent pas être mentionnés.

Les données recueillies pourront faire l'objet d'une demande de mise à jour par l'ANR jusqu'à 5 ans après la fin du projet.

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
MOREREAU Amandine	F	<a href="mailto:amandine.morereau@sorbonne-universite.fr">amandine.morereau@sorbonne-universite.fr</a>	07/2023	Doctorat	France	0	METIS	Post Doc	24	Février 2021	CDI	CEA	Ingénieur	non	néant
GARDES Thomas L	M	<a href="mailto:thomas.gardes@u-bordeaux.fr">thomas.gardes@u-bordeaux.fr</a>	06/2023	Doctorat	France	1	EPOC	Post Doc	15	Aout 2021	CDI	Privé	Cadre	non	Oui partiellement (gestion de projet)
PHUONG ngoc-nam	M	<a href="mailto:ngoc-nam.PHUONG@univ-amu.fr">ngoc-nam.PHUONG@univ-amu.fr</a>	09/2021	Doctorat	France	0	MIO	Post Doc	20	Janvier 2020	Post doc	Enseignement et recherche publique (CNRS)	Chercheur	oui	Analyses microplastiques
PELE Kathleen	F	<a href="mailto:kathleen.pelle@irsn.fr">kathleen.pelle@irsn.fr</a>	07/2023	Doctorat	France	0	IRSN	Post Doc	24	Février 2022	CDI	ASNR	Chercheur	oui	oui
FRICEAU Lucas	M	<a href="mailto:lucas.friceau@gmail.com">lucas.friceau@gmail.com</a>	01/2025	Licence	France	0	M2C	M2	6	Juin 2022	Doctorant (LEESU)	ENPC (EPSCP)	Doctorant	non	néant



LAYGLON Nicolas	M	<a href="mailto:nicolas.layglon@u-bordeaux.fr">nicolas.layglon@u-bordeaux.fr</a>	07/2025	Doctorat	France	3 en post Doctorat	EPOC	Post Doc	6	Septembre 2024	CDI	Enseignement et recherche publique (CNRS)	Chercheur	oui	oui partiellement (dev. analytique du dosage du platine)
SEIGNEMARTIN Gabrielle	F		07/2025	Post Doctorat	France		LEHNA	LEHNA		Novembre 2022					
VIDAL alicia	F		07/2025	Post Doctorat	France		MIO	MIO		Octobre 2023	Sans emploi				

### Aide pour le remplissage

- (1) **Adresse email** : indiquer une adresse email la plus pérenne possible
- (2) **Poste dans le projet** : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)
- (3) **Durée missions** : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet
- (4) **Devenir professionnel** : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles
- (5) **Type d'employeur** : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)
- (6) **Type d'emploi** : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)
- (7) **Lien au projet ANR** : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet
- (8) **Valorisation expérience** : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.

*Les informations personnelles recueillies feront l'objet d'un traitement de données informatisées pour les seuls besoins de l'étude anonymisée sur le devenir professionnel des personnes recrutées sur les projets ANR. Elles ne feront l'objet d'aucune cession et seront conservées par l'ANR pendant une durée maximale de 5 ans après la fin du projet concerné. Conformément à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'Informatique, aux Fichiers et aux Libertés, les personnes concernées disposent d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles les concernant. Les personnes concernées seront informées directement de ce droit lorsque leurs coordonnées sont renseignées. Elles peuvent exercer ce droit en s'adressant l'ANR (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact>).*