

Projet ANR-19-CE03-0009

TRAJECTOIRE

Programme PCR AAPG 2019

| | | |
|----------|---|-----------|
| A | IDENTIFICATION | 2 |
| B | LIVRABLES ET JALONS | 2 |
| C | RAPPORT D'AVANCEMENT | 3 |
| C.1 | Objectifs initiaux du projet | 3 |
| C.2 | Travaux effectués et résultats atteints sur la période concernée... 3 | 3 |
| C.3 | Difficultés rencontrées et solutions | 4 |
| C.4 | Faits et résultats marquants | 4 |
| C.5 | Travaux spécifiques aux entreprises (le cas échéant)..... | 5 |
| C.6 | Réunions du consortium (projets collaboratifs) | 5 |
| C.7 | Commentaires libres..... | 5 |
| D | VALORISATION ET IMPACT DU PROJET DEPUIS LE DEBUT | 6 |
| D.1 | Publications et communications | 6 |
| D.2 | Autres éléments de valorisation | 7 |
| D.3 | Pôles de compétitivité (projet labellisés) | 8 |
| D.4 | Personnels recrutés en CDD (hors stagiaires) | 9 |
| D.5 | État financier..... | 10 |
| E | ANNEXES EVENTUELLES | 10 |
| E.1 | Structure et Résumé graphique du projet ANR TRAJECTOIRE..... | 11 |
| E.2 | Diagramme de Gantt – Avancée des actions | 12 |
| E.3 | Synthèse des avancées du WP2 (Responsable IRSN ; Frédérique Eyrolle)..... | 13 |
| E.4 | Synthèse des avancées du WP3 (Responsable METIS ; Laurence Lestel) | 15 |
| E.5 | Synthèse des avancées du WP4 (Responsable RSN ; Hugo Lepage) | 16 |
| E.6 | Synthèse des avancées partenaire LSCE | 18 |
| E.7 | Synthèse des avancées partenaire MIO..... | 19 |
| E.8 | Synthèse des avancées partenaire M2C | 23 |
| E.9 | Synthèse des avancées partenaire LEHNA ENTPE | 25 |

Ce document est à remplir par le coordinateur en collaboration avec les partenaires du projet. Il doit être transmis par le coordinateur aux échéances prévues dans les actes attributifs :

1. à l'ANR
2. aux pôles de compétitivité ayant accordé leur label au projet.

L'ensemble des partenaires doit avoir une copie de la version transmise à l'ANR.

Il doit être accompagné d'un résumé public du projet mis à jour, conformément au modèle associé à ce document.

Ce modèle doit être utilisé uniquement pour le(s) compte(s)-rendu(s) intermédiaire(s) défini(s) dans les actes attributifs de financement, hors rapport T0+6 pour lequel il existe un modèle spécifique. Il existe également un modèle spécifique au compte-rendu final.

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) | Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire |
| Date de début du projet Date de fin du projet | 06/01/2020 05/07/2024 |
| Labels et correspondants des pôles de compétitivité (pôle, nom et courriel du corresp.) | |
| Site web du projet, le cas échéant | <u>Le projet TRAJECTOIRE (irsn.fr)</u> |

| | |
|---|----------------------------|
| Rédacteur de ce rapport | |
| Civilité, prénom, nom | Mme Frédérique Eyrolle |
| Téléphone | 04 42 19 95 12 |
| Courriel | Frederique.eyrolle@irsn.fr |
| Date de rédaction | Décembre 2021 |
| Période faisant l'objet du rapport d'activité | T0 + 18 mois |

B LIVRABLES ET JALONS

Quand le projet en comporte, reproduire ici le tableau des jalons et 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.

| N° | Intitulé | Nature* | Date de fourniture | | | Partenaires (souligner le responsable) |
|----|---------------------------------------|---------|---------------------|-------------|------------|--|
| | | | Prévue initialement | Replanifiée | Livrée | |
| 1 | Plan de gestion des données à 6 mois | PGD | 06/07/2020 | Non | 06/07/2020 | <u>IRSN</u> , MIO, EPOC, METIS, M2C, LSCE, LEHNA |
| 2 | Rapport intermédiaire à 18 mois | Rapport | 06/01/2022 | Non | | <u>IRSN</u> , MIO, EPOC, METIS, M2C, LSCE, LEHNA |
| 3 | Plan de gestion des données à 24 mois | PGD | 06/07/2022 | | | <u>IRSN</u> , MIO, EPOC, METIS, M2C, LSCE, LEHNA |
| 4 | Rapport intermédiaire à 36 mois | Rapport | 06/07/2023 | | | <u>IRSN</u> , MIO, EPOC, METIS, M2C, LSCE, LEHNA |

| N° | Intitulé | Nature* | Date de fourniture | | | Partenaires (souligner le responsable) |
|----|-----------------------------------|---------|---------------------|-------------|--------|--|
| | | | Prévue initialement | Replanifiée | Livrée | |
| 5 | Plan de gestion des données final | PGD | 05/07/2024 | | | <u>IRSN</u> , MIO, EPOC, METIS, M2C, LSCE, LEHNA |
| 6 | Rapport final | Rapport | 05/07/2024 | | | <u>IRSN</u> , MIO, EPOC, METIS, M2C, LSCE, LEHNA |

* jalon, rapport, logiciel, prototype, données, ...

C RAPPORT D'AVANCEMENT

C.1 OBJECTIFS INITIAUX DU PROJET

Maximum 10 à 20 lignes.

Le projet TRAJECTOIRE vise à établir, aux exutoires des grands bassins versants français (Rhône, Loire, Seine, Garonne, Rhin, Meuse, Moselle), les trajectoires des contaminants apportés par l'Homme. Il s'agit d'étudier leur parcours, depuis leur introduction dans l'environnement, jusqu'à leur présence dans les compartiments environnementaux, au cours des cent dernières années. Cette période a été rythmée à la fois par l'essor technologique et industriel (la « grande accélération du 20ème siècle) puis par une prise en compte progressive de l'impact de cet essor sur l'environnement. Trois grandes familles de contaminants introduits dans l'environnement par les activités humaines sont étudiées : les radionucléides, les microplastiques et leurs produits dérivés comme les phtalates, les métaux critiques. Les travaux de recherches permettront d'évaluer les trajectoires des contaminants étudiés, c'est à dire la réponse des environnements soumis aux perturbations anthropiques appliquées à leurs bassins versants, ainsi que la capacité des grandes rivières à revenir à leur état initial après une perturbation, c'est-à-dire leur capacité de résilience. Les données acquises fourniront en outre une aide précieuse pour la reconstruction de l'exposome. L'objectif final du projet TRAJECTOIRE est de développer un modèle prédictif des concentrations de contaminants dans les systèmes fluviaux en considérant l'évolution des pressions anthropiques sur la base de scénarii ; il établira en ce sens des trajectoires d'état prédictives. Le projet TRAJECTOIRE a pour ambition d'apporter aux parties prenantes une aide à la décision sur les mesures environnementales (réglementations), sur les modes de gestion des opérations de démantèlement et de remédiation ou encore sur les matériaux à utiliser par les nouvelles technologies, dans la perspective de la protection des hydrosystèmes.

C.2 TRAVAUX EFFECTUES ET RESULTATS ATTEINTS SUR LA PERIODE CONCERNEE

Maximum 1 page. Travaux et résultats obtenus pendant la période concernée, conformité de l'avancement des travaux avec le plan initialement prévu. Prévision de travaux pour la (les) prochaine(s) période(s).

Depuis le démarrage du projet en janvier 2020, le consortium s'est réuni quatre fois ; seule la dernière réunion, tenue début novembre dernier, a pu se dérouler en présentiel. Le projet TRAJECTOIRE dispose d'un site internet ([Le projet TRAJECTOIRE \(irsn.fr\)](http://Le projet TRAJECTOIRE (irsn.fr))) et d'un Share Point hébergé par l'IRSN permettant au consortium d'échanger l'ensemble des documents et résultats produits par le projet. Outre les actions programmées et déclinées dans le diagramme de Gant (cf Annexe B), des ateliers thématiques ont été organisés dans le cadre du **WP1** afin de partager des questionnements, notions et définitions de manière consensuelle ; Ces ateliers ont été réalisés par visioconférence à l'occasion des réunions du consortium : Atelier 1 « Niveaux d'anthropisation et valeurs référentielles » ; Atelier 2 « Trajectoire des contaminants et résilience » Atelier 3 « Comment/pourquoi traiter de manière environnementale le cycle de vie d'un métal d'intérêt économique et technologique? Atelier 4 « La notion de « well being », un état cible en géochimie ? » Cette cible peut (doit) elle être considérée comme une valeur de référence à atteindre ? Atelier 5 « Trajectoires futures et modèles prédictifs sur la base de scénarios ». Les travaux réalisés dans le cadre du **WP2**, dédiés à l'acquisition et à l'analyses des archives sédimentaires, sont globalement conformes à la programmation initiale (+ 6mois). Des

archives ont été collectées sur les fleuves LOIRE, RHONE, RHIN, MOSELLE et SEINE, et sont en bonne voie d'acquisition sur la MEUSE et la GARONNE. Pour les cinq premiers fleuves, les modèles âge/profondeur établis à partir des premiers résultats d'analyses par spectrométrie gamma (^{137}Cs , ^{210}Pb) fournissent des résultats très encourageants concernant la qualité des enregistrements et les périodes couvertes (cf Annexe C). Les résultats de spectrométrie gamma sont en cours d'exploitation mais révèlent déjà des résultats très originaux ; en particulier des excès significatifs de 40K dans l'archive RHIN concomitants à la période d'exploitation intensive des grandes mines de potasses d'Alsace. Les techniques de caractérisation des microplastiques et dérivés au sein des matrices sédimentaires fluviales donnent également des résultats très encourageants et permettent de souligner d'ores et déjà des trajectoires d'état très similaires pour le PVC, dans la Loire, le Rhône et le Rhin, au cours des cent dernières années, sous réserve de validation des données. Enfin, pour les métaux critiques, les méthodes d'analyse du Platine et du Gadolinium sur ce type de matrice ont été mises en place et les analyses sur les nombreux échantillons sont en cours.

Les travaux réalisés dans le cadre du **WP3** ont conduit à la construction des frises socio-chronologiques du platine et du gadolinium, qui présentent tous les deux des usages scellés présentant peu de fuite vers l'environnement, et des usages dissipatifs dans le secteur automobile (pots catalytiques) et médical (traitement anti cancéreux pour le platine et agent de contraste en IRM pour le gadolinium). L'ensemble de ces données sont organisées selon le schéma DPSIR (cf Annexe D) dans le but d'identifier des trajectoires, des ruptures ou des bifurcations ayant conduit à la situation telle qu'enregistrée dans les carottes sédimentaires analysées dans le WP2. La qualité des données fournies au WP4 dépend de l'abondance des sources mobilisables. De relativement nombreuses sources d'archives, de littérature scientifique et de données statistiques publiques ont pu être utilisées pour le platine. Elles étaient déjà plus rares pour le gadolinium. Certains radionucléides, naturels (NORM) ou artificiels, mais présentant des origines diversifiées ainsi le cycle de vie du PVC seront étudiés dans le dernier tiers du post-doctorat d'Amandine Morereau à partir de la mi-2022.

Les travaux réalisés dans le cadre du **WP4** ont porté sur la réalisation d'une synthèse bibliographique des dernières solutions mathématiques applicables à la problématique du projet TRAJECTOIRE, ainsi qu'au test de premiers outils sur le jeu de données du ^{137}Cs mesuré dans l'archive du Rhône aval : i) Prédiction d'une série temporelle par le procédé de logique floue, ii) Utilisation des ondelettes pour caractériser les séries temporelles, iii) Utilisation des réseaux neuronaux temporels (Annexe E).

Au regard de l'accélération des résultats déjà acquis, le **WP5** sollicitera en S1 2022, l'Editeur du journal STOTEN afin d'élaborer un numéro spécial recueillant les publications phares du projet.

C.3 DIFFICULTES RENCONTREES ET SOLUTIONS

Maximum 10 à 20 lignes. Difficultés éventuelles rencontrées et solutions de remplacement envisagées ex : impasse technique, abandon d'un prestataire, maîtrise des délais, maîtrise des budgets. Faut-il revoir le contenu du projet ? Faut-il revoir le calendrier du projet ?

Les principales difficultés effectives concernent la capacité analytique et les délais de rendu des résultats de la métrologie radioactive (>6 mois pour la spectrométrie gamma) ; ce qui nuit à la validation des modèles âge/profondeur dans les temps initialement programmés (**WP2**). Cette difficulté est liée aux conséquences de la crise sanitaire (effectifs en baisse au sein des laboratoires d'analyses, accélération du flux d'analyses lors du déconfinement). C'est un point de vigilance car d'inertie qui pourrait nuire, à terme, à l'obtention de l'ensemble des résultats escomptés d'ici la fin du projet (juin 2024).

C.4 FAITS ET RESULTATS MARQUANTS

En quelques lignes pour chaque fait ou résultat marquant. Cet élément pourrait donner lieu à communication, après accord du coordinateur du projet.

* Empreintes des grandes mines de potasses d'Alsace dans les sédiments du Rhin : des excès significatifs de 40K retrouvés sur la période autorisée pour les rejets d'effluents dans le Rhin ;
* Des anomalies de ^{230}Th dans les sédiments de la Loire sur la période 1960-1980, non expliquées à ce jour ;

- * 137Cs : les trajectoires d'état enregistrées pour ce radionucléide artificiel dans les archives des fleuves français (Loire, Rhône, Rhin, Moselle) au cours des 100 dernières années sont très différentes.
- * Cycle de vie des contaminants : La distinction entre les usages scellés générant peu de fuites vers l'environnement et les usages dissipatifs est fondamentale;
- * Usages (scellés/dissipatifs) et propriétés physico chimiques des contaminants : Un archivage sédimentaire fortement dépendant de ces deux paramètres.
- * Méthode d'analyse des microplastiques dans les matrices sédimentaires fluviales validée avec succès par l'équipe du MIO ;.
- * Le PVC est le microplastique dominant archivé dans les puits sédimentaires fluviaux ; Des trajectoires d'état similaires ont été obtenus sur 3 fleuves : le Loire, le Rhône et le Rhin ;
- * Choix du platine et du gadolinium pour étudier les trajectoires des métaux critiques ;
- * Les trajectoires prédictives considèreront les scénarios de rejets mais aussi les scénarios du changement climatique et des changements sociétaux ;
- * Collaboration avec l'Université de Strasbourg pour l'échantillonnage et l'étude de l'archive RHIN: 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 OHM Fessenheim
- * Collaboration avec l'Université de Lorraine l'échantillonnage et l'étude de l'archive MOSELLE : Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux, UMR 7360 CNRS, LIEC et Laboratoire LOTERR, Département de Géographie
- * Collaboration avec le SCK CEN (Belgian Nuclear Research Centre) pour l'échantillonnage de l'archive MEUSE.

C.5 TRAVAUX SPECIFIQUES AUX ENTREPRISES (LE CAS ECHEANT)

Entreprise xxx

Maximum 10 à 20 lignes par entreprise. Pour chaque entreprise du consortium, décrire les activités dans le projet, en se concentrant sur les apports, collaborations et perspectives liés au projet. Préciser notamment les perspectives d'application industrielle ou technologique, de potentiel économique et commercial, d'intégration dans l'activité industrielle, etc.

| | |
|-------------------------------|-----|
| Entreprise | Xxx |
| Rédacteur (nom + adresse mél) | |
| ... | |

C.6 REUNIONS DU CONSORTIUM (PROJETS COLLABORATIFS)

| Date | Lieu | Partenaires présents | Thème de la réunion |
|---------------|-----------|----------------------|--|
| 7-8/01/2020 | Cadarache | tous | Réunion de lancement |
| 15-16/10/2020 | Visio | tous | 2 ^{nde} Réunion du consortium |
| 29-30/04/2021 | Visio | tous | 3 ^{ème} Réunion du consortium |
| 2-3/11/2021 | Marseille | tous | 4 ^{ème} Réunion du consortium |

C.7 COMMENTAIRES LIBRES

Commentaires du coordinateur

Commentaire général à l'appréciation du coordinateur, sur l'état d'avancement du projet, les interactions entre les différents partenaires...

Malgré le confinement lié à la crise sanitaire et l'absence de débats dynamiques en présentiel, le consortium s'est montré pleinement investi dans le projet. Le projet est en phase d'accélération en termes de production de données, d'interactions entre les différents partenaires et de publications. Des résultats particulièrement originaux sont d'ores et déjà obtenus et l'atteinte des objectifs est en bonne voie malgré les difficultés rencontrées par les laboratoires en raison de la crise sanitaire (cf C3).

Commentaires des autres partenaires

Éventuellement, commentaires libres des autres partenaires

...

Question(s) posée(s) à l'ANR

Éventuellement, question(s) posée(s) à l'ANR...

...

D VALORISATION ET IMPACT DU PROJET DEPUIS LE DEBUT

Cette partie rassemble des éléments cumulés depuis le début du projet qui seront suivis tout au long de son avancée, et repris dans son bilan final.

D.1 PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Citer les publications résultant du projet en utilisant les normes habituelles du domaine. Si la publication est accessible en ligne, préciser l'adresse. L'ANR encourage, dans le respect des droits des co-auteurs et des éditeurs, à publier les articles résultant des projets qu'elle finance dans l'archive ouverte pluridisciplinaire HAL : <http://hal.archives-ouvertes.fr/>

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).

| Liste des publications multipartenaires (résultant d'un travail mené en commun) | | |
|---|---------------------------------|--|
| International | Revue à comité de lecture | <ol style="list-style-type: none">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. Trajectories of technogenic tritium in the Rhône River (France) - Archive ouverte HAL (archives-ouvertes.fr)Copard Y., Eyrolle F., Grosbois C, Lepage H., Ducros L., Morereau A., BODEREAU N., Cossonnet C., Desmet, M. (2021) The unravelling of radiocarbon composition of organic carbon in river sediments to document past anthropogenic impacts on river systems, Science of the Total Environment, in press. The unravelling of radiocarbon composition of organic carbon in river sediments to document past anthropogenic impacts on river systems - ScienceDirect |
| | Ouvrages ou chapitres d'ouvrage | |
| | Communications (conférence) | |
| France | Revue à comité de lecture | |
| | Ouvrages ou chapitres d'ouvrage | |
| | Communications (conférence) | |
| Actions de diffusion | Articles de vulgarisation | <ol style="list-style-type: none">Trajectoire : lire l'histoire des hommes dans les sédiments. Le Mag n°2, Rubrique Terre d'Experts, Juin 2020, p 8. |

| | | |
|--|-------------------------------------|---|
| | | 2. ANR Trajectoire 2020-2024 4ème réunion du consortium au MIO, les 2 et 3 novembre 2021 Institut Méditerranéen d'Océanologie (osupytheas.fr) |
| | Conférences de vulgarisation | 1. 2. |
| | Autres | 1. 2. |

| Liste des publications monopartenaire (impliquant un seul partenaire) | | |
|--|--|---|
| | Revue à comité de lecture | <ol style="list-style-type: none"> 1. 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. Highlights from a review of microplastics in marine sediments - ScienceDirect 2. Foucher, A., Chaboche, P.-A., Sabatier, P., Evrard, O. (2021) A worldwide meta-analysis (1977–2020) of sediment core dating using fallout radionuclides including 137Cs and 210Pbxs, Earth Syst. Sci. Data, 13, 4951–4966, https://doi.org/10.5194/essd-13-4951-2021 ; 3. 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 |
| | Ouvrages ou chapitres d'ouvrage | 1. 2. |
| | Communications (conférence) | 1. 2. |
| France | Revue à comité de lecture | 1. 2. |
| | Ouvrages ou chapitres d'ouvrage | 1. 2. |
| | Communications (conférence) | 1. 2. |
| Actions de diffusion | Articles de vulgarisation | <ol style="list-style-type: none"> 1. Mesure du tritium horloger dans les sédiments du Rhône, Le Mag n°7, Rubrique Terre d'Experts, Septembre 2021, p13. 2. 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) |
| | | 1. 2. |
| | Conférences de vulgarisation | 1. 2. |
| | Autres | 1. 2. |

D.2 AUTRES ELEMENTS DE VALORISATION

Les éléments de valorisation sont les retombées autres que les publications. 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,...).

Développement de nouveaux partenariats :

Les travaux du WP2 dédiés aux archives sédimentaires ont conduits à développer des collaborations, désormais ancrées, avec :

- 1. 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**
- 2. 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**

Ouverture internationale

Les travaux du WP2 dédiés aux archives sédimentaires ont conduits à initier une collaboration, avec :

- 1. SCK CEN** (Belgian Nuclear Research Centre) : pour l'étude du fleuve Meuse ; **TRAJECTOIRE MEUSE**

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

| Liste des éléments. Préciser les titres, années et commentaires | |
|--|----------|
| Brevets internationaux obtenus | 1. 2. |
| Brevet internationaux en cours d'obtention | 1. 2. |
| Brevets nationaux obtenus | 1. 2. |
| Brevet nationaux en cours d'obtention | 1. 2. |
| Licences d'exploitation (obtention / cession) | 1. 2. |
| Créations d'entreprises ou essaimage | 1. 2. |
| Nouveaux projets collaboratifs | 1. 2. |
| Colloques scientifiques | 1. 2. |
| Autres (préciser) | 1. 2. |

D.3 POLES DE COMPETITIVITE (PROJET LABELLISES)

Pour les projets labellisés par un ou plusieurs pôles de compétitivité,

Collaboration du projet avec le(s) pôle(s) ayant labellisé

Quelles collaborations y a-t-il eu entre votre projet et le(s) pôle(s) de compétitivité l'ayant labellisé ?

...

Activités financées par le complément de pôle (laboratoires publics uniquement)

Détailler les activités réalisées par les laboratoires publics avec le complément de financement accordé au titre de la labellisation. Préciser notamment les partenaires impliqués et la collaboration menée avec le ou les pôles.

| | |
|--|--|
| Montant du complément accordé par l'ANR (pour chaque labo public) | <ul style="list-style-type: none"> - Partenaire XXX : xxx € - Partenaire YYY : yyy € |
|--|--|

| Type d'action menée | Détails (exemples non limitatifs) | Dépenses complément de pôle* |
|--|---|-------------------------------------|
| Actions contribuant à la réflexion stratégique et à la programmation scientifique du pôle | Ex : Participation aux journées thématiques organisées par le pôle | Xxx : xxy € Yyy : yyy € |
| Actions de communication scientifique et publique bénéficiant à la notoriété du pôle | Ex : colloque de projets | Xxx : xxy € Yyy : yyy € |
| Développement de la recherche partenariale (recherche de partenaires, frais de gestion du partenariat, ingénierie de projets,...) | Ex : accord de consortium, frais de formation à la propriété intellectuelle, à la gestion de projets, dépenses relatives au montage du projet | Xxx : xxy € Yyy : yyy € |
| Valorisation de la recherche et transfert vers le monde industriel | Ex : étude de brevetabilité | Xxx : xxy € Yyy : yyy € |

* Estimation des dépenses imputées sur le complément de financement accordé au titre de la labellisation par un pôle de compétitivité, partenaires publics seulement.

D.4 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.

Des données complémentaires sur le devenir professionnel des personnes concernées seront demandées à la fin du projet. Elles pourront faire l'objet d'un suivi jusqu'à 5 ans après la fin du projet.

| Identification | | | | Avant le recrutement sur le projet | | | Recrutement sur 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 (ans) | Partenaire ayant embauché la personne | Poste dans le projet (2) | Date de recrutement | Durée missions (mois) (3) |
| MOREREAU Amandine | F | amandine.moreau@sorbonne-universite.fr | 11/2021 | Doctorat | France | 0 | METIS | Post Doc | Février 2021 | 15 |
| GARDES Thomas | M | thomas.gardes@unibordeaux.fr | 11/2021 | Doctorat | France | 1 | EPOC | Post Doc | Aout 2021 | 15 |
| PHUONG ngoc-nam | | ngoc-nam.PHUONG@univ-amu.fr | 09/2021 | Doctorat | France | 0 | MIO | Post Doc | Janvier 2020 | 20 |

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 ou prévues sur 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 à l'ANR (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact>).

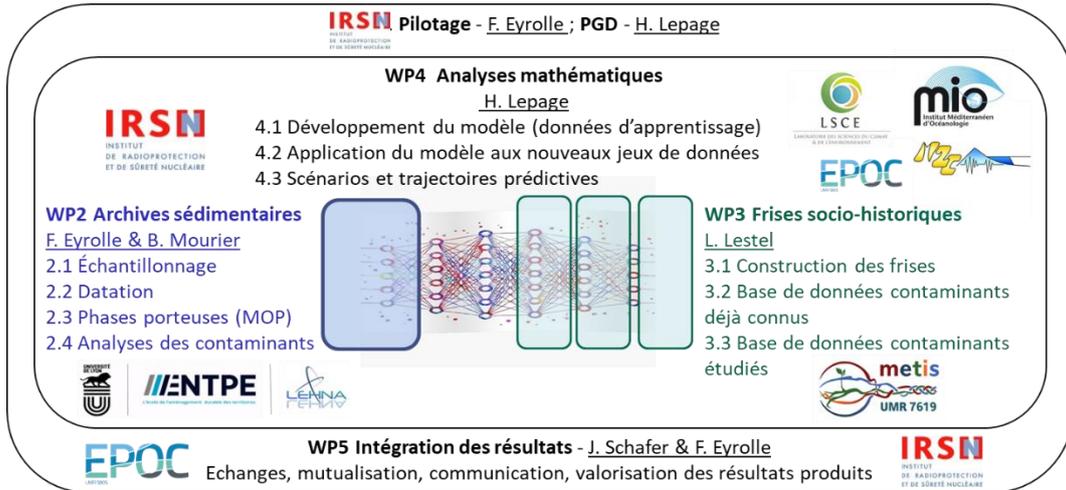
D.5 ÉTAT FINANCIER

Donner un état indicatif de la consommation des crédits par les partenaires. Indiquer la conformité par rapport aux prévisions et expliquer les écarts significatifs éventuels.

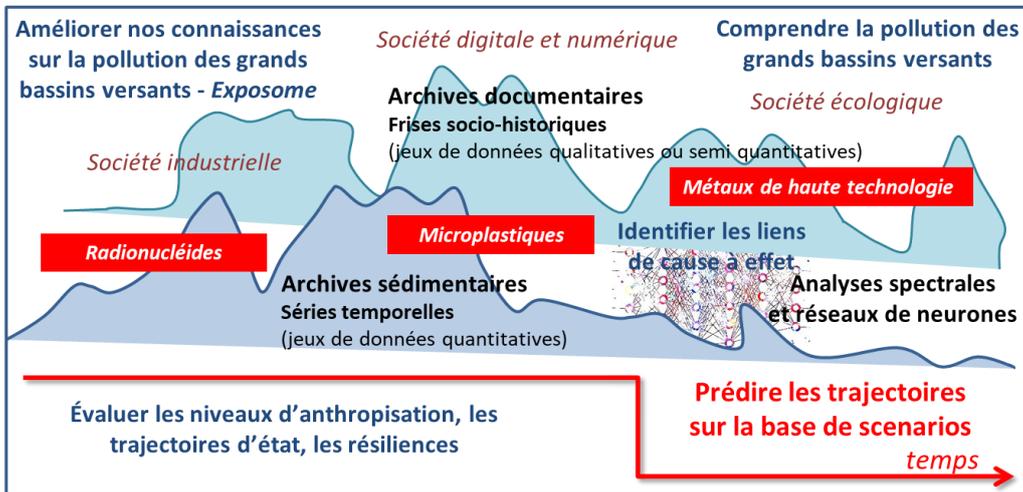
| Nom du partenaire | Crédits consommés (en %) | Commentaire éventuel |
|-------------------|--------------------------|---|
| IRSN | 52 | |
| LSCE | 11 | Missions reportées à cause de la pandémie |
| LEHNA/ENTPE | 6,05 | Dépenses plus conséquentes l'année prochaine (recrutement de 6 mois de post Doc) |
| METIS | 28 | |
| MIO | 84,76 | |
| EPOC | - | |
| M2C | 9,85 | incluant les frais généraux. La situation sanitaire n'a pas favorisé l'utilisation du montant disponible pour les missions (incluant meeting international). Au total, s'agissant du fonctionnement, l'ensemble sera dépensé à temps (27.5 k€), il sera envisagé de reporter en 2023 une partie du montant dédié aux missions (24 k€) si la situation sanitaire ne s'améliore pas. |

E ANNEXES EVENTUELLES

E.1 STRUCTURE ET RESUME GRAPHIQUE DU PROJET ANR TRAJECTOIRE



Structure et organisation du projet ANR TRAJECTOIRE (2020-2024)



Résumé graphique du projet ANR TRAJECTOIRE (2020-2024)

E.3 SYNTHÈSE DES AVANCÉES DU WP2 (RESPONSABLE IRSN ; FREDERIQUE EYROLLE)

Le WP2 a pour objectif de reconstruire les niveaux de concentrations des contaminants ciblés dans le cadre du projet à partir de l'étude d'archives sédimentaires collectées aux exutoires des grands bassins versants nucléarisés. Les familles de contaminants sont les radionucléides naturels et artificiels, les microplastiques et leurs dérivés organiques et les métaux de haute technologie (métaux critiques ou Terres Rares). Les bassins versants ciblés sont La Loire, le Rhône, le Rhin, la Meuse, la Moselle, la Seine et la Garonne.

Les archives sédimentaires sont recherchées aux exutoires des bassins versants (en aval du dernier affluent et en aval de la dernière installation nucléaire, et en amont des intrusions d'eau marines) afin de rendre compte des pressions appliquées à l'échelle des grands bassins versants. Les familles de contaminants étudiés ont été introduites au cours des différentes sociétés qui ont rythmé l'Anthropozoïque : la société industrielle de la « Grande Accélération », la société digitale et numérique, la société de hautes technologies, la société écologique. L'étude de 7 grands bassins versants doit permettre :

1. d'assurer la fourniture de jeux de données conséquents pour le WP4,
2. d'augmenter la probabilité d'acquies des jeux de données sur cas spécifiques, nécessaires afin d'établir des trajectoires prédictives pour le plus grand nombre de contaminants et de scénarios de contamination,
3. d'inter-comparer des bassins versants caractérisés par des pressions anthropiques et des caractéristiques géomorphologiques diversifiées.

L'enjeu fondamental du WP2 est l'acquisition d'archives sédimentaires fournissant un enregistrement le plus continu possible des flux ayant transité aux exutoires, couvrant les cents dernières années et caractérisé par un modèle d'âge/profondeur consolidé. De ce fondement dépend l'accès à la reconstruction historique de l'empreinte des contaminations.

Archives sédimentaires et datation

A ce stade du projet, des archives de la Loire, du Rhône, du Rhin et de la Moselle ont été collectées, respectivement en septembre 2020, novembre 2020, mars 2021 et juillet 2021. Les archives Rhin et Moselle ont été collectées en collaboration avec des équipes de l'Université de Strasbourg et de Lorraine, respectivement. Les environnements de dépôts et les conditions de dépôts (analyse des distributions granulométriques) sont acquis ou en cours d'acquisition (granulométrie) sur ces fleuves. Le site de carottage sur la Seine est identifié. Il s'agit du site déjà étudié dans le cadre de la thèse de Thomas Gardes. Une mission de terrain a été réalisée le 25 novembre 2021 afin de collecter l'archive Seine pour TRAJECTOIRE. Des datations préliminaires sur des échantillons déjà existants sur un site de la Garonne ont été réalisées (spectrométrie gamma, analyses des profils des métaux lourds). L'arrivée du post doctorant EPOC (T3 2021) va permettre de consolider le choix du site sur la Garonne et l'organisation du prélèvement de l'archive (en T1 2022). Enfin, la mission de prospection (pré carottages) sur la Meuse initialement programmée début décembre 2021 en collaboration avec le SCK CEN (Belgique) n'a pu être réalisée en raison des intempéries. Cette action est reprogrammée du 14 au 17 mars 2022.

Pour la Loire, le Rhône, le Rhin et la Moselle, le projet dispose désormais d'archives sédimentaires couvrant les 50 à cents dernières années et auxquelles un modèle d'âge/profondeur déjà robuste, utilisant les repères chronologiques du ^{137}Cs , des isotopes du plutonium (Loire), de ^{241}Am (Rhône) et du $^{210}\text{Pb}^{\text{xs}}$ (Foucher et al., 2021) a pu être associé (Figure 1). Les modèles de datation seront consolidés en utilisant si besoin les résultats de granulométrie (données non acquies) et les chroniques des débits (données partiellement acquies) qui permettent d'identifier des événements de crue majeurs et de les utiliser comme repères chronologiques additionnels (Approche multi proxy). Ces résultats sont donc très encourageants pour la suite du projet car ces archives vont permettre de reconstruire l'historique des concentrations des contaminants étudiés avec une incertitude restreinte sur le temps. De nombreux échantillons sont cours d'analyses sur le Rhône, la Loire, le Rhin et la Moselle.

Résultats phares sur les contaminants :

Radionucléides : i) Sur le Rhin, des enrichissements significatifs en 40K sont enregistrés au cours de la période d'exploitation des Grandes Mines de Potasse d'Alsace. La trajectoire d'état observée pour le 40K mime l'évolution des effectifs ouvriers des mines mais pourrait également refléter l'impact des différentes techniques d'extraction utilisées ; Entre 1910 et 2002, près de 567 millions de tonnes de sel brut riches en 40K ont été extraites du sous-sol alsacien. 20 ans après la fermeture de ces mines, les sédiments du fleuve semblent avoir retrouvé leur état initial pour ce contaminant (Thomas et al., in prep) ; ii) Sur la Loire, des anomalies en $^{210}\text{Pb}^{\text{xs}}$ (déficit) sur la période 1960-1980 sont liées à des teneurs excédentaires en ^{230}Th qui pourraient témoigner l'empreinte de l'exploitation des mines uranifères sur ce bassin versant (Eyrolle et al., in prep) bien que les rapports isotopiques $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ et $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$ ne semblent pas rendre compte de cette origine (Morereau et al. ; in prep) ; iii) Le ^{14}C rejeté par les industries nucléaires n'est pas conservé dans les archives sédimentaires fluviales car ces dernières ne stockent pas de matière pérenne la matière organique particulaire autochtone fraîche et labile, la seule susceptible de rendre compte des rejets industriels de ^{14}C (Copard et al., 2021) ; iv) Sur le Rhône, le fractionnement isotopique apparent du plutonium entre les sédiments en suspension (jeux de données de la surveillance 1985 -) et les sédiments déposés indique que dans les puits sédimentaires, les signatures isotopiques des rejets industriels ne sont pas conservatrices en raison de comportements géochimiques différenciés (fractionnement supporté/hérité ou vieillissement géochimique ; Ce fractionnement peut conduire à une sous-estimation des flux d'origine industrielle ayant transité (Eyrolle et al., in prep). Les trajectoires d'état

du ^{137}Cs dans la Loire, le Rhône, le Rhin et la Moselle sont très différentes (Figure 2) et soulignent les contributions relatives des différents termes sources (Eyrolle et al., in prep).

Microplastiques et leurs dérivés organiques : Les méthodes d'extraction et de caractérisation des microplastiques et dérivés organiques archivés dans les puits sédimentaires ont été approfondies (Phuong et al.; 2021). Les résultats d'analyses acquis sur les archives sédimentaires de la Loire, du Rhône et du Rhin indiquent des trajectoires très similaires pour le PVC, archivés en très grande majorité dans ces milieux, comparativement aux autres types de microplastiques (Phuong et al.; in prep).

Métaux critiques : Synthèse sur l'impact des mines métallurgiques implantées sur le bassin versant de la Garonne ; analyse des trajectoires et résilience au cours des 70 dernières années (Schäfer et al., 2022). Les techniques d'analyses sont développées pour le platine et le gadolinium ; les 2 métaux critiques phares du projet TRAJECTOIRE. Les analyses sont en cours.

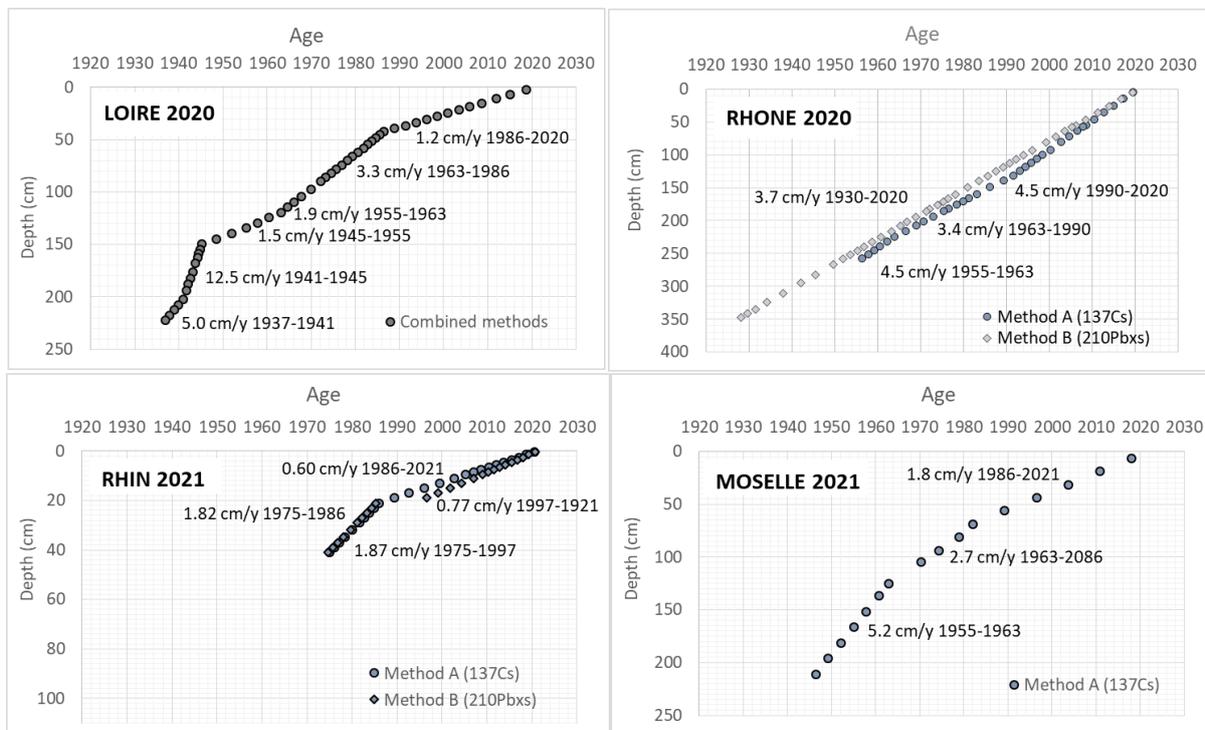


Figure 1 : Modèles âge/profondeur établis définitivement pour la Loire (1937-2021), le Rhône (1928-2021) et le Rhin (1975-2021), provisoirement pour la Moselle (1946-2021).

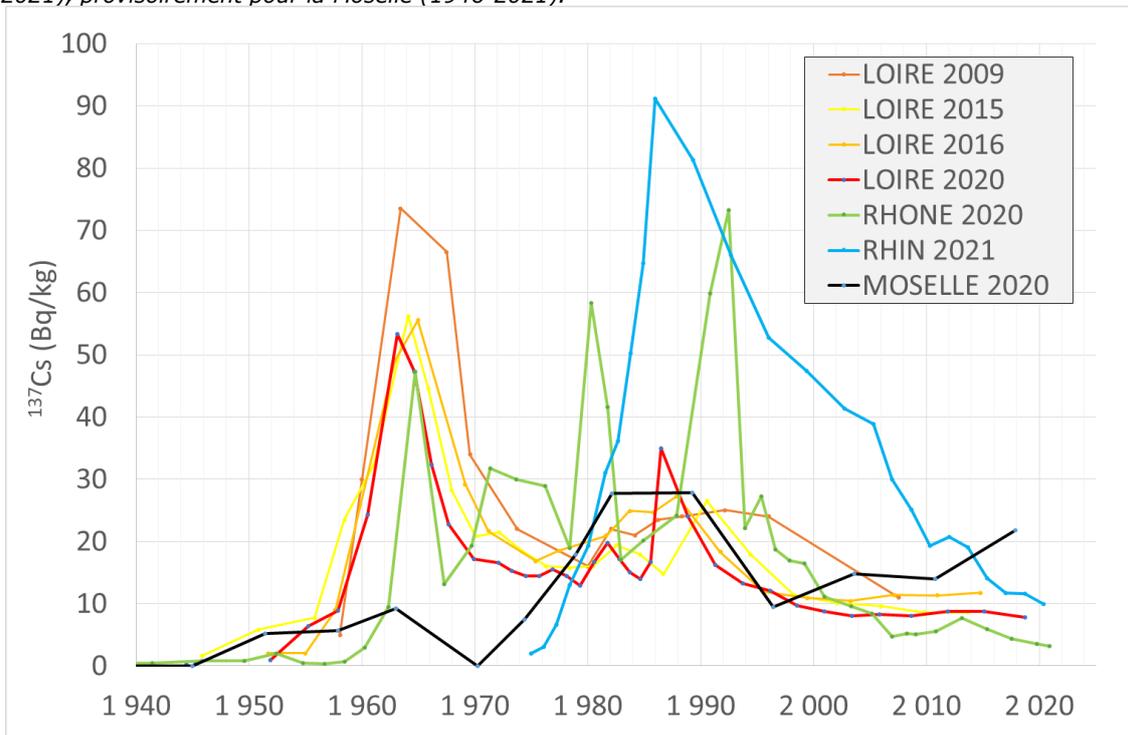


Figure 2 : Trajectoires d'état du ^{137}Cs dans les sédiments de la Loire, le Rhône, le Rhin et la Moselle ; résiduel en 2021.

E.4 SYNTHÈSE DES AVANCÉES DU WP3 (RESPONSABLE METIS ; LAURENCE LESTEL)

Le WP3 a pour but d'identifier, pour les différentes classes de produits étudiées, les sources possibles de transfert de ces produits vers l'environnement, en fonction de leur circulation dans la sphère anthropique, et d'apporter des éléments pour comprendre leur présence dans les différents bassins versants étudiés dans le programme.

Trois catégories de contaminants avaient été envisagées : les métaux émergents et les terres rares ; les radionucléides ; et les microplastiques. Le début du post-doctorat d'Amandine MOREREAU en février 2021 a permis d'avancer rapidement sur la construction des frises socio-chronologiques du platine et du gadolinium, qui présentent tous les deux des usages scellés présentant peu de fuite vers l'environnement, et des usages dissipatifs dans le secteur automobile (pots catalytiques) et médical (traitement anti-cancéreux pour le platine et agent de contraste en IRM pour le gadolinium).

Les données analysées sont issues essentiellement de deux sources principales :

- les articles scientifiques, eux-mêmes de deux registres : les analyses de flux de matière (MFA) dans la sphère anthropique, par des économistes, et les articles étudiant la présence et/ou les concentrations de ces produits dans l'environnement et ayant recherché les causes de cette présence dans l'environnement.
- les dossiers des archives nationales, issus essentiellement du Ministère de l'Industrie, et plus particulièrement de l'Observatoire des Matières Premières, permettant d'affiner les connaissances sur la circulation de ces produits en France.

Ces données sont complétées par les statistiques économiques, quand elles existent, et par l'identification des législations ayant trait à ces produits.

L'ensemble de ces données sont organisées selon le schéma DPSIR, prôné par l'Agence Européenne de l'Environnement, afin d'identifier les facteurs de contrôle de ces flux de matière (Drivers D), les types de pression exercées sur les milieux (P), les réponses apportées par la société (R) aux impacts (I) sociétaux ou environnementaux liés à la présence de ces produits dans l'environnement (State S), dans le but d'identifier des trajectoires, des ruptures ou des bifurcations ayant conduit à la situation telle qu'enregistrée dans les carottes sédimentaires analysées dans le WP2.

L'estimation des rejets vers l'environnement nécessite de mobiliser des données générales comme la population par bassin versant, l'évolution du parc automobile français ou le nombre d'appareils IRM en service, pour l'exemple du platine et du gadolinium.

Ces différents types d'informations sont organisées en bases de données spatiales et temporelles qui sont en cours de transfert vers le WP4 qui, en croisant les résultats des analyses des carottes sédimentaires avec celles issues de ce WP3, vérifiera la cohérence des trajectoires passées et simulera les trajectoires futures en fonction de scénarios qu'il conviendra de préciser.

La qualité des données fournies au WP4 dépend de l'abondance des sources mobilisables. De relativement nombreuses sources d'archives, de littérature scientifique et de données statistiques publiques ont pu être utilisées pour le platine. Elles étaient déjà plus rares pour le gadolinium. Elles sont malheureusement confidentielles en ce qui concerne les radionucléides et nous n'avons pas encore obtenu l'autorisation de consulter les documents les concernant repérés aux Archives Nationales. Suite à la dernière réunion des partenaires en novembre 2021, nous avons retenu deux pistes : une rencontre avec des personnes ressources de l'IRSN pouvant nous indiquer des sources archivistiques publiques, et l'étude du ⁴⁰K dont la source principale est le potassium des engrais, ce qui ouvre le champ à des sources très abondantes sur l'usage des engrais potassiques en France. Pour les microplastiques, les premiers résultats de leur analyse dans les sédiments présentés par le partenaire MIO lors de la réunion de novembre 2021 a permis d'établir le très bon enregistrement du PVC dans ces carottes sédimentaires. Une étude bibliographique devra conforter cette analyse avant que nous n'entreprenions l'étude du cycle de vie du PVC dans le dernier tiers du post-doctorat d'Amandine MOREREAU à partir de la mi-2022.

E.5 SYNTHÈSE DES AVANCÉES DU WP4 (RESPONSABLE RSN ; HUGO LEPAGE)

Le WP4 a pour but de mettre en relation les données acquises dans les archives sédimentaires (WP2) avec celles acquises dans les archives documentaires (WP3) en utilisant des outils mathématiques basés sur l'intelligence artificielle.

En attendant l'acquisition (en cours) des données par les WP2 et WP3, les travaux du WP4 ont porté sur la réalisation d'une synthèse bibliographique des dernières solutions mathématiques applicables à notre problématique, ainsi qu'au test de premiers outils sur le jeu de données du ^{137}Cs mesuré dans l'archive du Rhône aval.

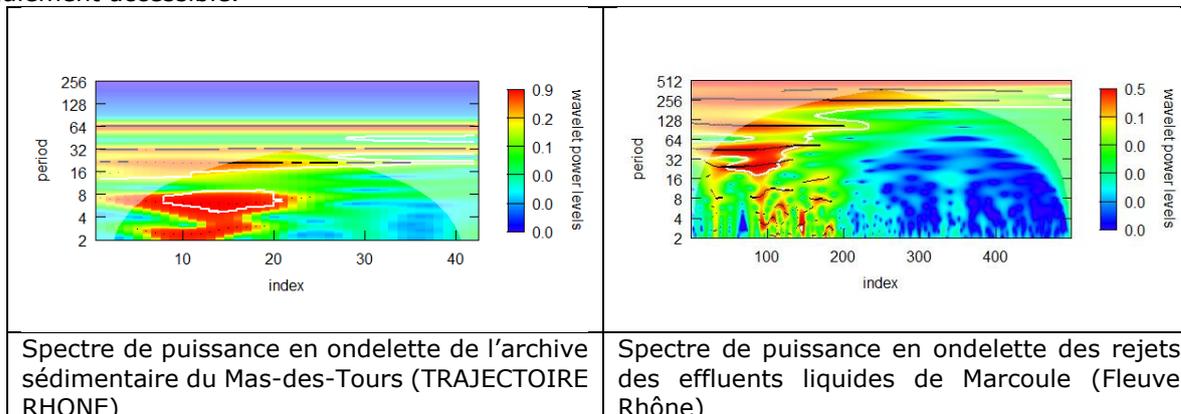
Prediction d'une série temporelle par le procédé de logique floue

Nous avons pu établir des prédictions de séries temporelles des rejets de ^{137}Cs à partir des séries temporelles des matières en suspension (MES) et des débits par le procédé de logique floue [1] qui catégorise le monde numérique en établissant des règles dans un monde linguistique. La combinaison de la logique floue avec des réseaux neuronaux (architecture ANFIS) est une perspective intéressante [2,3,4,5].

Utilisation des ondelettes pour caractériser les séries temporelles

Les intérêts de l'utilisation des ondelettes lorsque l'on est en présence de séries temporelles non stationnaires sont multiples [6,7,8], notamment lorsque le jeu de données initiales ne contient pas suffisamment de données pour alimenter les modèles d'IA :

- Le spectre de puissance du signal par application des ondelettes est une visualisation colorée du signal. C'est l'image en 3 dimensions (Profondeur x Période x Puissance) du signal en 2 dimensions (profondeur x Valeur de concentration). Ainsi suivant la granularité des périodes que l'on investigate, le spectre de puissance permet d'augmenter considérablement le nombre de données (par exemple sur l'archive sédimentaire du Mas-des-Tours, nous avons 42 données de concentration en ^{137}Cs en Bq/kg sur chacune des strates, l'analyse en ondelette donne 73742 valeurs de puissance).
- Nous avons une visualisation de l'importance du mode oscillatoire : les périodes cachées du signal apparaissent. Ce qui est très utile pour identifier des événements caractéristiques de la sédimentation.
- Ces modes oscillatoires sont localisables temporellement. Il est possible d'obtenir une localisation temporelle des modes périodiques et apériodiques et donc de dater les événements observés dans les archives sédimentaires et de les mettre en correspondance avec des événements socio-historiques.
- L'évolution temporelle du pourcentage de variance expliquée par un mode périodique donné est également accessible.



L'observation des deux spectres de puissance en ondelette des rejets des effluents liquides de Marcoule et de l'archive sédimentaire du Mas-des-Tours, révèle l'application d'un processus de compression de données qu'il sera avantageux de construire par une technique de réseau neuronal [9,10] afin de l'utiliser à des fins prospectives.

Utilisation des réseaux neuronaux temporels

Les archives sédimentaires sont une trace spatiale d'événements temporels. Au lieu de vouloir rendre temporel le signal des archives par une datation, on va garder sa forme originelle et utiliser des modèles qui traitent du temps pour caractériser ces archives. Un modèle qui traite du temps se préoccupe de problèmes d'ordre temporel en gardant la trace du temps tandis qu'un modèle qui utilise le temps a une architecture indépendante de la notion de temporalité. Plusieurs modèles traitent du temps soit de façon externe par une représentation spatiale, soit de façon explicite soit de façon implicite par une représentation dynamique [10].

References :

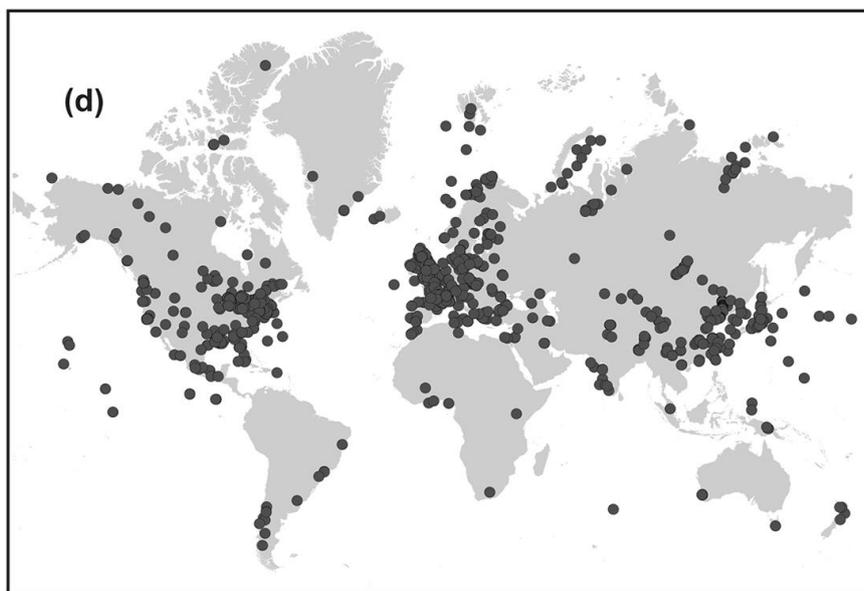
1. Lohani et al. 2009 Deriving stage–discharge–sediment concentration relationships using fuzzy logic
2. Buyukyildiz 2017 An Estimation of the Suspended Sediment Load Using Adaptive Network Based Fuzzy Inference System, Support Vector Machine and Artificial Neural Network Models
3. Muhammad 2019 Application of ANFIS, ANN and fuzzy time series models to CO2 emission from the energy sector and global temperature increase

4. Larrea et al. 2011 Application of Neural Network Models and ANFIS for Water Level Forecasting of the Salve Faccha Dam in the Andean Zone in Northern Ecuador
5. Tiwari et al. 2018 Performance Evaluation of Two ANFIS Models for Predicting Water Quality Index of River Satluj (India)
6. Aguiar-Conraria et al. 2008, Using wavelets to decompose the time–frequency effects of monetary policy
7. Cazelles et al. 2007 Time-dependent spectral analysis of epidemiological time-series with wavelets
8. Goyal 2014 Modeling of Sediment Yield Prediction Using M5 Model Tree Algorithm and Wavelet Regression
9. Gaur et al. 2020 Application of Artificial Neural Network Model for the Prediction of Suspended Sediment Load in the Large River
10. Boudjelal Meftah 2011 Thèse : Contribution des Réseaux de Neurones Temporels dans le Traitement des Images Animées.

E.6 SYNTHÈSE DES AVANCÉES PARTENAIRE LSCE

La datation des archives sédimentaires récentes (< 100 à 150 ans) constitue un prérequis pour les reconstitutions environnementales telles que celles qui sont prévues dans le cadre du projet ANR TRAJECTOIRE. L'analyse du radiocésium (^{137}Cs) émis lors des essais thermonucléaires atmosphériques (~ 1950-1980) et les accidents nucléaires tels que celui de Tchernobyl (1986) ainsi que celle de la diminution de l'excès de plomb-210 ($^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$) avec la profondeur dans les archives sont souvent combinées pour établir la chronologie des carottes sédimentaires. Bien que ces méthodes aient été largement utilisées au cours des dernières décennies, il manquait une synthèse mondiale structurée et complète des analyses de radionucléides utilisées pour la datation des archives sédimentaires. La revue de la littérature qui vient d'être publiée en accès libre (<https://essd.copernicus.org/articles/13/4951/2021/essd-13-4951-2021.html>) est basée sur la compilation de 573 articles publiés entre 1977 et 2020, rapportant la collecte de 1351 carottes sédimentaires qui ont été datées individuellement (l'ensemble des données recueillies est accessible en ligne à l'adresse <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.931493>). Cette revue a été réalisée dans le but de synthétiser les bonnes (et moins bonnes) pratiques de la communauté internationale en la matière. Elle visait aussi à cartographier les sites où des retombées de ^{137}Cs avaient été enregistrées. En plus du pic de 1963 lié au maximum des retombées associées aux essais thermonucléaires atmosphériques et des impacts de l'accident de Tchernobyl (Ukraine) en 1986 et de celui de Fukushima (Japon) en 2011, les conséquences de 24 autres événements identifiés sur 112 sites qui ont entraîné des rejets radioactifs locaux ou régionaux ont pu être relevées. (On peut citer, par exemple, les impacts associés aux accidents du site de Sellafield au Royaume-Uni et à ceux des essais nucléaires chinois). Lorsque les chroniques des analyses de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ont été utilisées avec les données ^{137}Cs , des informations détaillées sur les modèles âge-profondeur construits à partir de ces données ont également été synthétisées.

Au vu du nombre croissant d'études analysant des archives sédimentaires à des fins de reconstitutions environnementales et climatiques, cette synthèse spatialisée fournit dès lors la première compilation mondiale permettant de caractériser les sources et les niveaux de radionucléides enregistrés à l'échelle globale. Cette synthèse fournit en particulier un cadre de référence pour l'attribution coordonnée des pics



de ^{137}Cs à des événements particuliers (et donc à des années particulières) afin d'améliorer les pratiques de datation des archives sédimentaires. Elle propose également toute une série de recommandations (informations et données de base à fournir systématiquement dans toute publication future, partage des résultats, etc.) qui devraient faciliter l'inter-comparaison des résultats d'une étude à l'autre et accélérer le partage des données au sein de la communauté scientifique internationale.

Localisation des sites de prélèvement des 1351 archives sédimentaires comprises dans la base de données de synthèse publiée dans le cadre de l'ANR TRAJECTOIRE.

E.7 SYNTHÈSE DES AVANCÉES PARTENAIRE MIO

1. Introduction

Au cours de ces derniers 18 mois, le MIO a réalisé des analyses pour l'ANR TRAJECTOIRE. Le groupe microplastiques (MPs) et contaminants organiques a procédé au développement de méthodes analytiques pour l'extraction, l'identification et la caractérisation des MPs et d'additifs dans les matrices environnementales notamment dans le sédiment. Toutes les extractions sont réalisées en salle blanche classe ISO 6, l'opérateur est muni des EPIs nécessaires à sa sécurité et à la non contamination des échantillons.

2. Développement des protocoles et analyses des MPs par LDIR 8700

La caractérisation des MPs se fait par LDIR 8700 (Laser Direct InfraRed, nouvelle technologie Agilent). Cet appareil permet une analyse IR automatique des particules sur une zone donnée (correspondance des spectres générés avec ceux d'une bibliothèque enrichie en MPs standards). Il permet également d'obtenir l'image, l'identification (spectre), la taille et l'épaisseur des particules.

Les protocoles développés concernent les matrices environnementales suivantes : eau de mer, moules, estomacs de poissons et sédiment.

A partir de ces protocoles, des tests sur un panel de filtres de différentes compositions (acétate de cellulose, nitrate de cellulose, GF/F, PTFE, PES, PC, papier...) ont été faits pour trouver le filtre permettant la meilleure réponse de l'appareil. Des tests de fiabilité de du LDIR ont aussi été effectués, en dopant ces différentes matrices avec des MPs de références (standards CARAT). Ce travail fait l'objet d'une publication scientifique en cours de préparation (Ourgaud et al., in prep, soumission en décembre 2021).

Les analyses d'échantillons réels TRAJECTOIRE ont été réalisées sur le sédiment (carottes) provenant de 3 sites, le Rhône, la Loire et le Rhin (environ 70 échantillons de 1931 à 2020). Il est envisagé de réaliser des répliqués pour s'assurer de la fiabilité des résultats obtenus (environ 140 analyses à venir sur ces mêmes sites).

Le protocole d'extraction a été optimisé. Les étapes sont les suivantes : digestion du sédiment avec du H₂O₂, une remise en suspension des MPs à l'aide de NaCl 35% et de centrifugation (10 min, 3500 rpm) puis isolement des MPs par filtration du surnageant sur filtres PC (Ø 25 mm, porosité : 8 µm).

Le contrat post-doctoral de 18 mois, prévu pour l'aide au développement des protocoles d'analyses de MPs sur les matrices environnementales est, à ce jour, terminé.

3. Développement des protocoles et analyses d'additifs par GC-MS et LC-MS

Les analyses d'additifs débuteront en 2022, le protocole est encore en cours de développement pour l'extraction des composés à analyser en LC-MS (BPs, PFAS et mPAEs), sur les sédiments. L'optimisation de l'extraction des additifs dans les sédiments sera développée en s'appuyant sur les méthodes Fauvelle et al. (2018) et Castro & Ratola (2020).

Le protocole concernant l'extraction des composés à analyser en GC-MS (PAEs et OPEs) est quant à lui établi.

La finalité de ce développement serait de coupler les deux protocoles pour nous permettre d'utiliser une quantité minimum d'échantillon réel et d'optimiser les temps d'extraction.

4. Résultats préliminaires

4.1. Résultats d'analyses des MPs

4.1.1. Sédiments TRAJECTOIRE

Les analyses des sédiments des 3 fleuves montrent une augmentation significative de la concentration en MPs au cours du temps (1930 - 2020) (cf figure 1).

Les résultats dans le détail montrent que le PVC et le PET sont les polymères majoritaires trouvés dans les sédiments de ces 3 fleuves. Ils représentent à eux seuls 47 à 58 % des MPs totaux.

Et le PET est clairement le polymère le plus abondant des années 60 (cf Figures 2, 3 et 4).

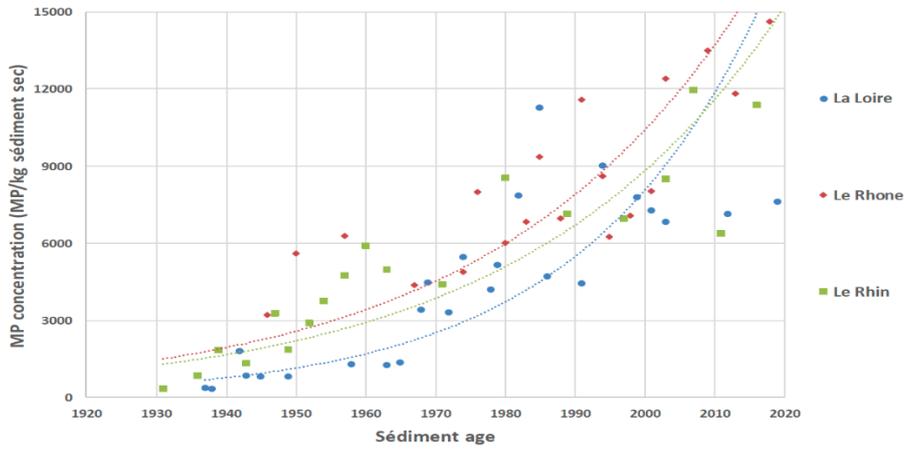


Figure 1 : Concentrations en MPs de la LOIRE, du RHÔNE et du RHIN au cours du temps.

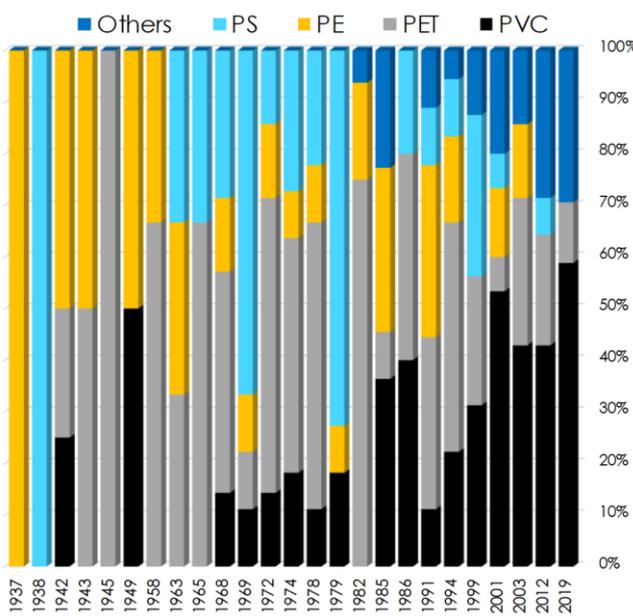


Figure 2 : Répartition des MPs dans la LOIRE de 1937 à 2019.

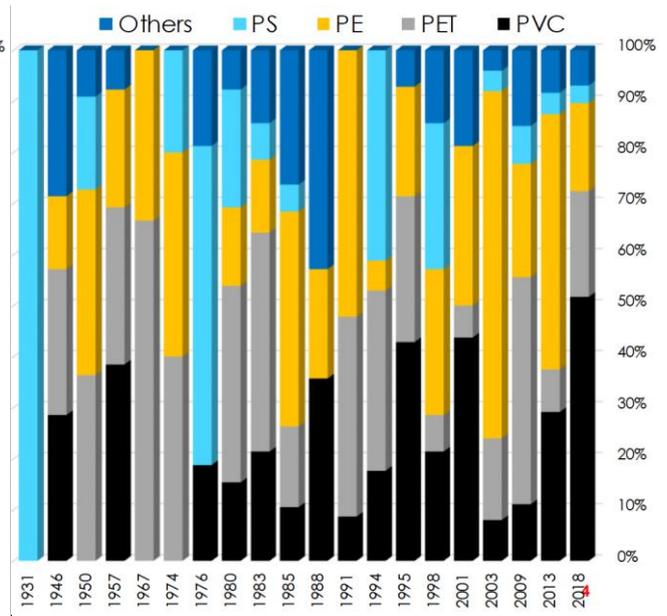


Figure 3 : Répartition des MPs dans le RHÔNE de 1931 à 2018.

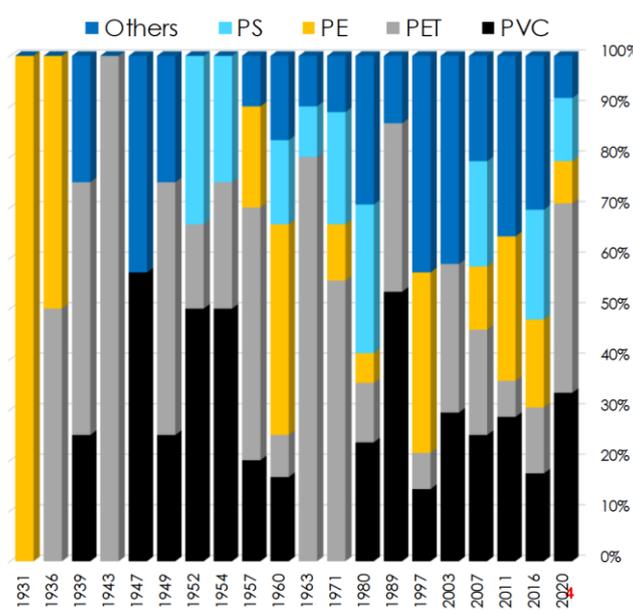


Figure 4 : Répartition des MPs dans le RHIN de 1931 à 2020.

4.1.2. Matrices environnements (résultats non publiés, diffusion restreinte à ce document)

Les analyses de MPs par LDIR sur les différentes matrices environnementales (compartiments) ont permis d'identifier une dizaine de polymères différents. Dans ces 10 polymères identifiés, il en ressort 5 majoritaires : le PS (polystyrène), le PET (polytéréphtalate d'éthylène), le PE (polyéthylène), le PP (polypropylène) et le PVC (polychlorure de vinyle). Ces 5 MPs représentent 77% des MPs totaux trouvés (cf Figure 5).

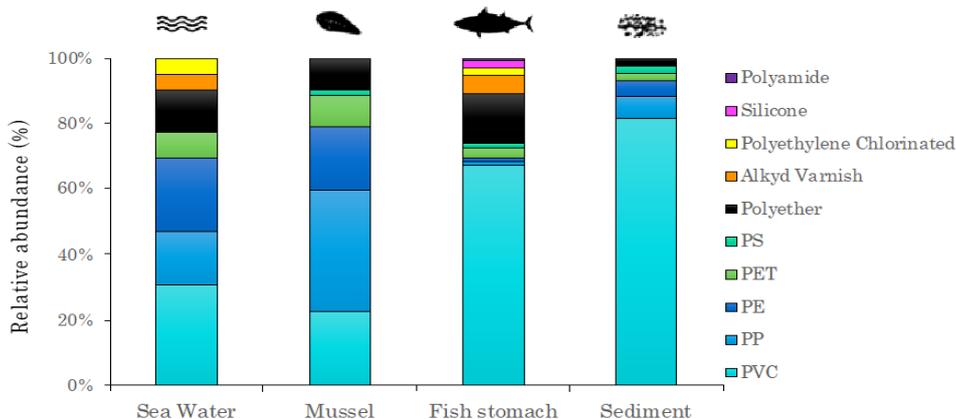


Figure 5 - Identification et quantification des MPs par LDIR sur les différents

A l'issue des analyses, des MPs ont été trouvés dans tous les compartiments (cf Tableau 1).

| Compartiments | Lieu de prélèvement | MPs |
|---|---|--------------------------------|
| Eau de mer | Large de la Baie de MARSEILLE, mer Méditerranée | 805 400 MPs.km ⁻² |
| Sédiment | Large de la Baie de MARSEILLE, mer Méditerranée | 2530 MPs.kg ⁻¹ ww |
| Moules | Large de la Baie de MARSEILLE, mer Méditerranée | 10 MPs.individu ⁻¹ |
| Estomacs de poissons (espèces pélagiques) | BANYULS | 220 MPs.individu ⁻¹ |

Tableau 1 : Résultats des analyses des différents compartiments par LDIR

4.2. Résultats des additifs

Les analyses d'additifs seront réalisées sur les mêmes coupes de carottes que celles utilisées pour les analyses de MPs pour les 3 sites cités précédemment. Ce travail représentera plus de 200 dosages chimiques de composés organiques. Les additifs étudiés sont 7 PAEs (DMP, DEP, DnBP, BBzP, DEHP, DnOP, DiBP), 9 OPEs (TPP, TiBP, TnBP, TCEP, TCPP, TDCP, TPhP, EHDPP, TEHP), 6 BPs (BP A, BP AF, BP AP, BP F, BP S, BP Z) et 4 PFAS (PFHA, PFHS, PFOA, PFOS).

Les résultats des additifs sont prévus pour courant 2022 pour les 3 sites sites précédemment.

5. Discussion

Depuis janvier 2020, le groupe micro-plastiques et contaminants organiques du MIO s'emploie à élaborer des protocoles d'extraction et d'analyses pour la quantification et l'identification de MPs et d'additifs dans les matrices environnementales et plus particulièrement dans le sédiment afin de traiter les échantillons de l'ANR TRAJECTOIRE.

Les résultats préliminaires des analyses de MPs obtenus permettent d'observer la présence de polymères majoritaires (PE et PS) dans les sédiments de rivières dès les années 30, avec une diversification (multiplication) des polymères retrouvés au cours du temps. Ils montrent également que certains polymères comme le PET et le PVC se retrouvent bien plus en abondance dans l'environnement que d'autres.

6. Conclusion et perspectives

Les analyses sont bien engagées malgré certains désagréments comme des soucis d'alimentation en N₂ liés à un générateur sous dimensionné.

Les résultats en additifs pour ces 3 fleuves sont prévus pour le premier semestre 2022.

Comparaison des résultats de MPs avec ceux 4 autres fleuves du projet.
Analyses et comparaison des résultats d'additifs des 7 fleuves du projet.
Corrélation des résultats des MPs avec ceux des d'additifs pour chacun des fleuves.
Observation de l'évolution des concentrations (MPs et additifs) dans les années à venir ?

Références :

- (1) Ourgaud, M., Phuong, N.N., Papillon, L., Fauvelle, V., Schmidt, N., Galgani, F., Panagiotopoulos, C., Brach-Papa, C. & Sempéré, R. (in prep, soumission en décembre 2021) Identification and quantification of microplastics in the marine environment using Laser direct infra-red (LDIR) technique.
- (2) Fauvelle, V., Castro-Jiménez, J., Schmidt, N., Carlez, B., Panagiotopoulos, C., & Sempéré, R. (2018). One-Single Extraction Procedure for the Simultaneous Determination of a Wide Range of Polar and Nonpolar Organic Contaminants in Seawater. *Frontiers in Marine Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00295>
- (3) Castro-Jiménez, J., & Ratola, N. (2020). An innovative approach for the simultaneous quantitative screening of organic plastic additives in complex matrices in marine coastal areas. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(10), 11450–11457. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08069-9>

E.8 SYNTHÈSE DES AVANCÉES PARTENAIRE M2C

ANALYSES SÉDIMENTOLOGIQUES & DE LA MATIÈRE ORGANIQUE SÉDIMENTAIRE

Potentiel de l'imagerie hyperspectrale

Les capteurs d'imagerie hyperspectrale du laboratoire M2C (VNIR-SWIR) ont analysé 3 carottes, celles de la Loire, du Rhône et du Rhin. Ces capteurs sont capables d'enregistrer certains composés en continu à une résolution fine (50-350 microns) sans destruction de l'échantillon pour fournir des teneurs semi-quantitatives, qui nécessite toutefois une calibration (méthodes destructives). Les proxies retenus sont les oxydes de fer, la matière organique et les argiles (kaolinite, illite, smectite). Ces proxies peuvent être utilisés pour recalibrer plus finement les différentes sections pour la reconstruction de la master-core, et aussi aiguiller les échantillonnages d'autres indicateurs. Des méthodes d'intelligence artificielle peuvent aussi être utilisées pour apprendre d'autres variables d'intérêt qui possèdent des absorptions dans les gammes spectrales des capteurs, comme le TOC, la granulométrie, les pollutions organiques et métalliques avec les validations adéquates. Cependant, de nombreux défauts de surface, impactant le signal et les estimations, amènent à prendre des précautions. De fait, toutes ces observations devront être validées et croisées avec d'autres méthodes analytiques. Au cours de la dernière réunion du consortium tenue dans les locaux du MIO (Marseille), un rapprochement entre les WP2-hyperspectrale et WP4 a été envisagé sur les approches d'intelligence artificielle. En effet, celles-ci utilisées dans ces deux WP sont similaires et peuvent nécessiter la gestion d'un large volume de données issu de l'imagerie hyperspectrale.

nb: suite à des biais méthodologiques ou de préparation des échantillons, les analyses granulométriques devront être à revoir en effectuant cette fois-ci des mesures tous les 1 ou 2 cm.

Analyse géochimique de la MO sédimentaire

Ces 3 carottes ont été examinées par une méthode visant à caractériser le contenu géochimique global de la MO. Cette méthode (cf. Lafargue et al., 1998, Baudin et al., 2015 pour plus de détails) permet une dégradation thermique complète de la MO fournissant la teneur e TOC (wt. %) ainsi que d'autres indicateurs qualitatifs utilisés dans cette étude comme la richesse en hydrogène (S_2 en mg. g⁻¹sed et HI en mg. g⁻¹TOC et), la richesse oxygène (OI, mgO₂. g⁻¹TOC), et la quantité de Corg délivrée lors de la phase de combustion (RC) rapportée au TOC (RC/TOC). Ces analyses ont été menées à l'OSU Ecclera, laboratoire ISTeP de Sorbonne Université (F. Baudin). A cette méthode, des résultats de radiocarbon (ARTEMIS, lab. LM¹⁴C) pour les sédiments de la Loire sont également présentés.

Les sédiments de la Loire, dont le TOC varie entre 5.10 et 0.24 wt. %, montrent une signature géochimique typique d'une MO détritique provenant du bassin versant. Bien que tous les échantillons aient une signature très proches des horizons organo-minéraux de sol, les paramètres qualitatifs, notamment le rapport RC/TOC, révèlent qu'un premier groupe d'échantillons (G1: 222.5-124.5 cm, 1937-1959) contient une MO plus réfractaire que le second groupe (G2: 119.5-0 cm, 1963-2016), plus labile. Dans le détail, une étude approfondie (Copard et al., in press) de la signature ¹⁴C de ces échantillons couplées à des données tirées de la littérature et d'une base de données interne à l'IRSN a montré que cette la distinction des deux groupes était liée à un changement de sources du matériel érodé en lien avec une modification drastique du mode d'occupation des surfaces (remembrement). Par ailleurs, l'exploitation fine des valeurs du $\Delta^{14}C$ a non seulement restitué la part du dead-C mais aussi celle, plus ténue, de la MO d'origine aquatique. Ainsi en comparant le pic $\Delta^{14}C$ atmosphérique avec celui de l'archive, il a été possible de calculer un temps moyen de transfert du Corg dans les bassins versants compris entre 7 et 22 ans (fig. 1) ; comparable à celui estimé avec le tritium (Eyrolle et al., 2019). Enfin, la suppression de la dilution du dead-C (age < 60 kyr) et de la signature de la MO aquatique a permis de restituer un âge moyen de la MO détritique qui peut atteindre 6300 ans (âge ¹⁴C) dans le groupe G1.

A l'exception d'un échantillon de surface, 2.63 wt. % (15 cm de prof.), le TOC des sédiments du Rhône varie peu 1.49 à 0.47 wt. %, et montre une signature géochimique typique d'une MO ligno-cellulosique détritique provenant du bassin versant. Il paraît bien difficile d'établir une logique de distribution en fonction de la profondeur et les paramètres qualitatifs, telle la confrontation S_2 vs TOC, indiquent une succession de différentes sources possibles. L'exploitation du rapport RC/TOC et HI/OI souligne une MO plutôt réfractaire, appauvrie en hydrogène avec un rapport RC/TOC plus élevé en moyenne que les échantillons du groupe G2 et relativement proche du groupe G1 de la carotte de Montjean / Loire.

La MO des sédiments du Rhin prélevés à Rhinau montre une très belle décroissance du contenu organique avec des teneurs en TOC allant de 5.27 à 0.17 wt. % pour des profondeurs respectivement de 1.5 cm à 74 cm. Une telle décroissance peut être visible par exemple dans des profils pédologiques (sans les horizons organiques). Ici encore, la MO est essentiellement détritique, provenant du bassin versant, mais demeure labile si l'on se réfère aux paramètres qualitatifs tels que le rapport RC/TOC ou HI/OI. A l'exception d'un échantillon prélevé en surface, la MO aurait une nature commune (S_2 vs TOC) et subirait un processus de dégradation dont l'intensité serait constante au cours du temps.

Au total, ces 3 carottes contiennent tous de la MO sédimentaire d'origine détritique, provenant du bassin versant (sol, formation superficielle et pour la Loire, mais aussi certainement pour le Rhône, de la MO

géologique). Celle du Rhin et de la partie supérieure de la Loire apparaissent plus réactives (labiles) que celles stockées dans le Rhône et dans la seconde moitié de la carotte de la Loire. Ce caractère labile/réfractaire contrôlant la capacité de stockage ou de déstockage des contaminants, notamment métalliques, son étude peut trouver un intérêt dans la dynamique des contaminants transitant et stockés plus ou moins durablement dans les grands fleuves industrialisés français. D'un point de vue de la dynamique sédimentaire, il sera nécessaire de coupler les informations sédimentologiques (granulométrie) et géochimiques (XRF) pour identifier les épisodes de crue. Avec l'utilisation d'un modèle d'âge robuste, ces épisodes pourront être remis dans une perspective chronologique. Enfin des calculs de taux de dégradation du Corg, lorsque cela s'y prête notamment pour le Rhin, pourront également être estimés si ceci revêt d'un intérêt particulier (cinétique de libération des contaminants).

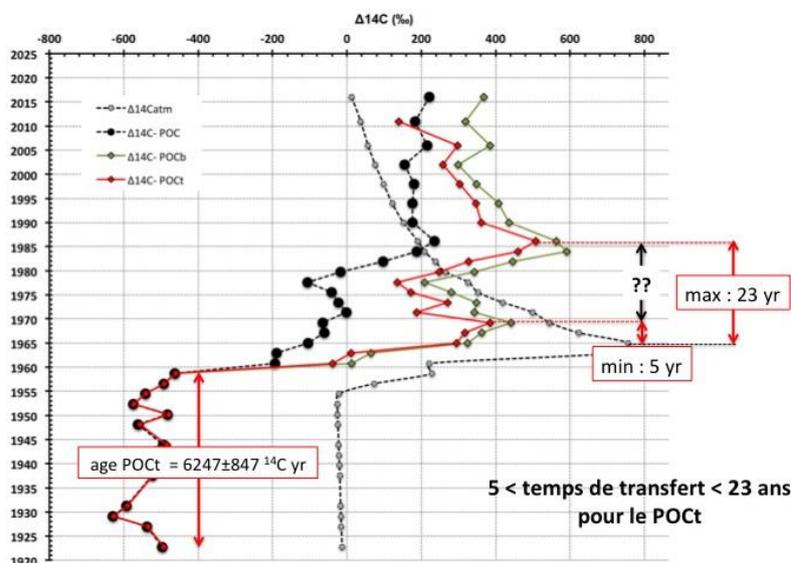


Figure 1: signaux $\Delta^{14}\text{C}$ en fonction du temps. $\Delta^{14}\text{C}_{\text{atm}}$: valeur de référence atmosphérique, $\Delta^{14}\text{C-POC}$: valeur de la MO sédimentaire, $\Delta^{14}\text{C-POCb}$: valeur de la MO biosphérique en excluant la fraction dead-C , $\Delta^{14}\text{C-POCt}$: valeur de la MO biosphérique provenant du bassin versant. Les temps de transfert sont compris ici entre 5 et 23 ans pour la MO détritique biosphérique (modifié Copard et al., in press)

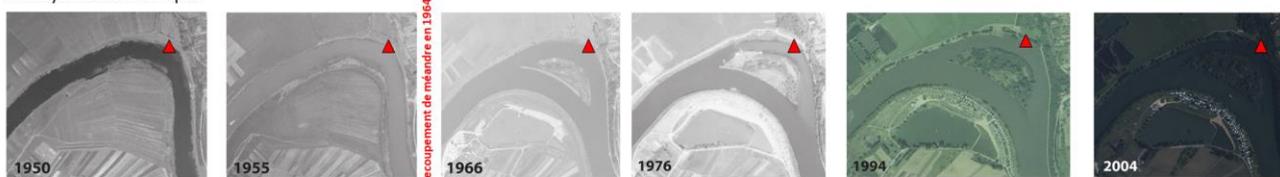
E.9 SYNTHÈSE DES AVANCÉES PARTENAIRE LEHNA ENTPE

Les archives sédimentaires sont d'incalculables témoins de l'histoire des masses d'eau et particulièrement là où les suivis sont rares ou hétérogènes dans l'espace et le temps. L'archive est collectée la plupart du temps sous forme de carotte sédimentaire, dont la caractérisation permet de retracer l'évolution de divers paramètres et des processus ou perturbations associés au cours du temps. Une carotte sédimentaire constitue un échantillon idéalement continu d'un point de vue temporel, mais ponctuel d'un point de vue spatial. C'est pour cette raison que les archives collectées dans ce projet sont positionnées à l'exutoire des bassins dans divers environnements de dépôt.

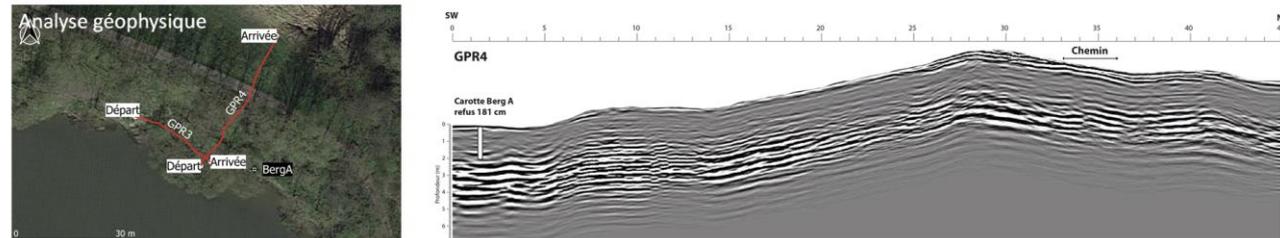
La variabilité spatiale des dépôts sédimentaires fluviaux peut être efficacement appréhendée par la combinaison d'analyses diachroniques, de sondages géophysiques et de carottages sédimentaires. En effet, c'est par le couplage de ces différentes approches qu'il est possible d'évaluer la représentativité du site et des archives sédimentaires et de renforcer la chronologie. L'utilisation de photographies aériennes pour caractériser les changements géomorphologiques des espaces alluviaux est une approche couramment utilisée depuis les années 1990. De plus, les méthodes géophysiques présentent l'avantage de fournir des images du sous-sol et de ses structures sédimentaires de façon rapide et non-invasive. En recoupant ces informations, les environnements de dépôt les plus pertinents sont identifiés pour optimiser l'implantation des carottes sédimentaires. Il peut, par exemple, être intéressant de positionner une carotte sur une superposition de structures sédimentaires afin de maximiser la diversité de l'information recueillie par la carotte, ou de choisir d'extraire une carotte par structure sédimentaire identifiée.

L'objectif général de ce travail s'inscrit dans le WP2 et vise à étudier les processus sédimentaires intervenant sur les sites d'étude du projet afin (i) d'optimiser le positionnement des carottes et la chronologie et (ii) évaluer la représentativité des trajectoires pour l'intercomparaison.

Analyse diachronique



Analyse géophysique



Exemple de la première étape d'une diachronie et des résultats bruts de l'analyse géophysique sur le site du bassin de la Moselle

L'objectif de ce travail est de réaliser un catalogue impliquant la production de cartes de localisation et de diachronies des sites sous SIG et d'uniformiser des données disponibles (log, granulométrie, géophysique, contaminants) sur l'ensemble des sites. Il sera assuré par l'arrivée d'un(e) postdoctorant(e) pendant 6 mois en 2022 qui travaillera sur l'uniformisation du format des données et permettra aux partenaires du projet de bénéficier de fiches de synthèse par bassin. Elles seront constituées d'informations concernant les caractéristiques géohistoriques du bassin versant, le contexte géographique local du secteur d'étude, l'évolution diachronique du site de prélèvement et la synthèse des principaux paramètres mesurés sur les carottes sédimentaires. Le lien entre indicateurs planimétrique, géophysique et paramètres sédimentaires permettra d'évaluer les processus sédimentaires des sites et d'optimiser la chronologie des carottes. Enfin, ce travail questionnera la concordance des trajectoires individuelles obtenues pour chaque carotte avec les tendances globales de contamination selon les bassins.