



PIREN-Seine

Phase 9 (2025-2028)



Déclinaison 2025-2026 du programme pluri-annuel







Sommaire

Sommaire	3
Vue d'ensemble.....	7
1. Axe 1 : Vulnérabilités du bassin de la Seine et de ses territoires face au changement climatique	8
BLOC 1.1. Mieux comprendre la mécanique des aléas - intégrer les dynamiques climatiques sur le long terme	9
1.1.1 Visage climatique long terme du bassin de Paris	10
1.1.2 Caractérisation des aléas hydroclimatiques depuis le XIXe siècle	11
1.1.3 Scénarisation des aléas hydroclimatiques dans le bassin de la Seine et ses territoires	12
1.1.4 Évolution des températures de l'hydrosystème Seine face à l'augmentation des usages anthropiques et de la température de l'air.....	14
1.1.5 Déclinaison aux échelles territoriales : le cas de la Bassée	16
BLOC 1.2. Gestion des risques et adaptation(s) : réflexivité des territoires et acteurs face aux aléas et leurs vulnérabilités.....	18
1.2.1 Les industries et le risque inondation en vallée de Seine. Approche historique (1815-1975)	18
1.2.2 Trajectoires d'adaptation via solutions fondées sur la nature – Seine amont.....	19
2. Axe 2 : Les flux de matières dans les filières et leurs impacts territoriaux	21
BLOC 2.1. Atelier « Grain à moudre » pour le PIREN-Seine.....	21
BLOC 2.2. AgrEauClim. Évolution de la demande en eau des filières agricoles de diversification ...	22
BLOC 2.3. Pol-Plastic. La filière plastique : flux passés, consommations actuelles, projections.....	23
2.3.1 Les politiques publiques de prévention et l'expertise	24
2.3.2 La filière logistique fluviale.....	24
2.3.3 Travail de prospective	25
BLOC 2.4. Villes et transition énergétique comme sources de contaminants	25
2.4.1 Analyse rétrospective et prospective de contaminations liées à l'industrie et la transition énergétique.....	25
2.4.2 Minéralogie urbaine	26
3. Axe 3. Histoire, paysages, territoires et restauration écologique.....	28
BLOC 3.1. La Bassée.....	29
3.1.1 Évolution fluviale en Bassée à long-terme et très long-terme, forçages climatiques et anthropiques	29
3.1.2 Penser ensemble les transitions passées et futures de la plaine alluviale de la Bassée – Collectif acteurs-chercheurs.....	30
BLOC 3.2. Les petites rivières franciliennes.....	31
3.2.1 Typologie et Trajectoires des PEtites Rivières Franciliennes (T ² -PERIF).....	31
3.2.2 Relations des populations aux Petites rivières franciliennes (RP-PERIF)	33

3.2.3	Transport de la charge de fond : accès à la ressource, obstacle à la continuité et restauration.....	34
4.	Les contaminants — niveaux et effets dans les écosystèmes et sur la santé.....	36
BLOC 4.1.	Ecodynamique de la multi-contamination et rôle du biote.....	37
4.1.1	Suivi long terme de la contamination par les pesticides (et les antibiotiques) dans le ru des Avenelles.....	37
4.1.2	Microplastiques dans le bassin de l'Orgeval : sources, dynamiques et transferts.....	38
4.1.3	Dynamique spatio-temporelle de la contamination à l'antimoine	39
4.1.4	Archives sédimentaires : Sources historiques et trajectoires de contamination.....	41
4.1.5	Mécanismes naturels de dégradation et transformation des contaminants organiques	42
4.1.6	Biofilms microbiens et transfert de polluants.....	44
BLOC 4.2.	Effets de la contamination globale sur les écosystèmes et les organismes	46
4.2.1	Biosurveillance de contaminants chimiques et biologiques	46
4.2.2	Évaluation multi-échelles de la réponse des biomarqueurs chez la dreissène pour une application en biosurveillance environnementale.....	49
4.2.3	Impact écologique de la saisonnalité des transferts de pesticides vers les cours d'eau : évaluation intégrée multi-échelles sur le bassin versant agricole drainé d'Orgeval	50
4.2.4	Multicontaminations et Impacts en contexte Péri-Urbain : le bassin versant de l'Orge comme site modèle.....	52
4.2.5	Contribution des parasites dans la dynamique des polluants et conséquences écotoxicologiques.....	54
4.2.6	Antibiorésistance en milieu aquatique urbanisé : contribution des gastéropodes aquatiques.....	55
BLOC 4.3.	Part de l'eau dans l'exposome et rétroactions anthropogéniques	57
4.3.1	La contamination en micropolluants des particules atmosphériques : impacts sur la contamination des retombées atmosphériques et impacts sanitaires.....	57
4.3.2	Rôle de l'Interaction Bactéries – Amibes au sein des Biofilms dans l'Émergence de bactéries pathogènes et de l'antibiorésistance	59
4.3.3	Suivi des <i>E. coli</i> et des risques de contamination fécale dans les eaux.....	60
5.	Axe 5 : Transferts biogéochimiques le long du continuum Homme-Terre-Mer sous changements socioclimatiques.....	62
BLOC 5.1.	Fonctionnement thermique et biogéochimique des milieux aquatiques : modélisation et apports des données satellitaires	62
5.1.1	Quels effets des augmentations de la température sur le fonctionnement biogéochimique des eaux du bassin de la Seine	63
5.1.2	CoMoD'eau - Couleurs des Eaux et Modélisation Biogéochimique des Réservoirs.....	64
5.1.3	Fonctionnement thermique et biogéochimique des plans d'eau urbains face aux changements hydrométéorologiques.....	65
BLOC 5.2.	Les transferts et transformations du Carbone dans le continuum aquatique de la Seine et aux interfaces terrestres	67



5.2.1	C-FLUXES : Quantification des flux de carbone inorganique et organique, du bassin des Avenelles à celui de la Seine : variabilité spatiale et temporelle	68
5.2.2	Suivi le long de l'axe Seine des transferts de matière organique et métaux (SAXSO) ..	70
5.2.3	Caractérisation de la dynamique de la MO en rivières grâce à un suivi à haute fréquence (Fluocopée).....	71
BLOC 5.3. Modélisation des transferts hydrosédimentaires et dynamique de la contamination en pesticides dans le bassin de la Seine		74
5.3.1	Trac'eau : Tracer et quantifier les flux d'eau aux interfaces	74
5.3.2	HydroSedSeine, Fonctionnement hydro-sédimentaire et biogéochimique des rivières : apports de l'imagerie satellitaire pour la modélisation du bassin versant de la Seine	77
5.3.3	Compréhension et modélisation du transfert des pesticides à l'échelle du bassin de la Seine	79
6.	Transfert de connaissances	81
BLOC 6.1. La cellule de transfert des connaissances.....		81
BLOC 6.2. Des données partagées et accessibles.....		84
6.2.1	Science ouverte au PIREN-Seine.....	84
6.2.2	Vers des approches de <i>Data visualization</i>	85
7.	Références.....	90





Vue d'ensemble

La phase 9 du programme de recherche PIREN-Seine s'inscrit dans la continuité des phases antérieures visant à mettre en synergie scientifiques et gestionnaires de l'eau et des milieux aquatiques du bassin de la Seine afin de construire un socio-écosystème durable et résilient face aux événements extrêmes hydroclimatiques, aux évolutions socio-économiques et aux enjeux de biodiversité et de santé.

Le programme a contribué à améliorer la connaissance du fonctionnement du bassin et de ses territoires dans le temps long par le biais d'un travail intense de collecte de données. Ces dernières ont été analysées pour conceptualiser les processus à l'œuvre. Des outils de simulation ont été construits pour modéliser leurs fonctionnements et aider à la construction et à la reconstitution de trajectoires. Cela a donné lieu à une production scientifique et technique sous forme de multiples ouvrages, articles scientifiques, rapports techniques et documents synthétiques s'adressant à un public élargi. L'ensemble de ces valorisations sont accessibles sous forme numérique via un site internet très riche et sont faciles à questionner par mot clé (www.piren-seine.fr). Cela a aussi nourri des ateliers territoriaux pour co-construire des questions de recherche avec les acteurs des territoires, notamment sur la Bassée.

Cette phase 9 approfondit l'interdisciplinarité entre savoirs biophysiques sur le bassin et savoirs sur les groupes sociaux et leurs pratiques qui influencent, et sont influencés, par ce bassin. Elle est structurée en cinq axes de travail et un volet transfert de connaissance afin de répondre aux grands défis environnementaux sur les interdépendances territoriales des filières, la restauration écologique et les contaminants dans un climat changeant.

Le premier axe porte sur la **vulnérabilité des territoires et des systèmes de gestion de l'eau** à des événements hydroclimatiques particulièrement impactants comme des sécheresses pluriannuelles, des réchauffements importants de la ressource en eau ou des crues concomitantes à des périodes de hautes eaux dans les nappes.

Le second axe porte sur l'évolution future des **flux de matières dans les filières** et leurs impacts territoriaux, avec un intérêt particulier sur les plastiques, les réseaux énergétiques, les différents systèmes agrialimentaires du bassin, la construction et les contaminants.

Le troisième axe s'intéresse à l'évolution sur **le long terme des paysages du bassin**, autour du fleuve Seine, de ses affluents et des petits cours d'eau pour replacer la question de la restauration écologique dans une dynamique sociale, sédimentaire et écologique de longue durée.

Le quatrième axe abordera conjointement les enjeux de **santé et de biodiversité posés par les contaminants** afin d'améliorer les connaissances pour dépasser une approche produit par produit et caractériser l'effet de la pression chimique vis-à-vis des autres pressions sur le socio-écosystème.

Le cinquième axe améliorera les connaissances sur l'évolution des contaminants et de la matière organique le long du **continuum homme-terre-mer** pour proposer des simulations à partir des scénarios construits dans les autres axes.

Enfin, les axes 1 et 5 intégreront dans leurs simulations des éléments de scénarisation identifiés comme des options contrastées et intéressantes à tester dans les axes 2 à 4 afin que les cinq axes s'enrichissent mutuellement pour identifier des leviers d'action vers une plus grande résilience du bassin de la Seine.

1. Axe 1 : Vulnérabilités du bassin de la Seine et de ses territoires face au changement climatique

L'évaluation des impacts hydrologiques et thermiques du changement climatique dans le bassin de la Seine est au cœur de la réflexion développée dans cet axe. Nous chercherons à identifier les vulnérabilités de ses territoires aux événements hydroclimatiques et à évaluer de possibles solutions d'anticipation et d'adaptation intégrant leur gouvernance. Les méthodes d'évaluation des impacts du changement climatique mobiliseront les notions d'aléas et de risques, qui permettront de mettre en perspective les représentations et perceptions des différents acteurs des territoires afin de mieux comprendre leur appréhension et leur sensibilité aux aléas et les moyens qu'ils ont à titre individuel ou collectif, à la petite ou à la grande échelle, d'y répondre.

Les impacts des événements exceptionnels seront évalués en tenant compte de tous les usages de l'eau, d'un point de vue tant quantitatif que qualitatif (réseaux d'eau urbains, navigation, logistique, agriculture, tourisme, extraction de granulats, production d'énergie, etc.). Nous adapterons si nécessaire les outils disponibles au sein du PIREN-Seine afin de pouvoir traiter le problème des crues à l'échelle du bassin, mais également à celle des territoires. Les potentiels de stockage en lit majeur seront notamment évalués, dans un cadre de scénarisations hydroclimatiques originales permettant d'anticiper les impacts d'événements critiques du point de vue du socio-écosystème Seine et de ses territoires.

D'un point de vue méthodologique, nos réflexions s'appuieront sur les travaux précédemment réalisés au PIREN-Seine, notamment au cours de la phase précédente, aussi bien du point de vue des outils d'évaluation déjà disponibles qu'en matière de compréhension du fonctionnement du bassin face aux extrêmes hydroclimatiques. Nous bénéficierons également de la déclinaison, en matière de trajectoire hydrothermique du bassin de la Seine, des projections climatiques issues de l'exercice CMIP6 et mises à l'échelle du bassin lors de la phase 8.

Ainsi, nous mettrons d'une part l'accent sur les approches visant à quantifier et qualifier les aléas hydrologiques d'origine climatique, en explorant par exemple de nouvelles techniques de descente d'échelle ou de simulations de situations hydrologiques extrêmes, tout en caractérisant les incertitudes associées. Nous nous interrogerons d'autre part sur les modalités d'action des acteurs confrontés aux manifestations du changement climatique, et ce, à différentes échelles spatiales et temporelles. Dans cette réflexion, la question des incertitudes et des moyens de les estimer sera au cœur de nos interrogations. Les niveaux d'incertitude associés aux fréquences d'occurrence pourront ainsi être examinés au regard des scénarios considérés, climatiques ou de gestion des lacs réservoirs en particulier.

L'ensemble du travail entrepris, par sa pluralité disciplinaire, permettra la caractérisation des vulnérabilités en tenant compte des durées d'exposition à l'aléa et du temps de retour à la norme, envisageant de possibles effets dominos, directs et indirects. Notre analyse portera également sur les représentations de la vulnérabilité territoriale dans le passé et aujourd'hui dans le contexte du changement climatique, par le biais de dépouillement d'archives, d'entretiens avec les acteurs du territoire (en cherchant à avoir un focus sur les activités économiques et urbaines importantes des territoires ciblés), mais aussi de démarches participatives avec les citoyens (type groupes de discussion ou conférences citoyennes) qui permettront de saisir les représentations actuelles des risques et de la vulnérabilité et leur évolution au regard des éléments apportés par les chercheurs.



BLOC 1.1. Mieux comprendre la mécanique des aléas - intégrer les dynamiques climatiques sur le long terme

Nous nous plaçons dans la perspective générale de réévaluer les aléas inondation et sécheresse au regard des impacts du changement climatique, qui a pour conséquence l'augmentation des intensités des événements pluvieux, tout en réduisant leur fréquence d'occurrence. Ce double phénomène s'intensifie d'autant plus que le réchauffement global est important. Il s'accompagne d'un accroissement des pressions anthropiques autour des usages de l'eau, dans un contexte de moindre disponibilité de la ressource. Nous nous attacherons pour ce faire à caractériser l'aléa puis la vulnérabilité à celui-ci, à différentes échelles spatiales et temporelles caractéristiques du bassin de la Seine et de ses territoires, en tenant compte des incertitudes associées à chaque étape de l'analyse, que nous aurons quantifiées.

La caractérisation des aléas suppose une étude détaillée des mécanismes de leur genèse dans le contexte du changement climatique, qui bénéficiera de l'éclairage apporté par l'analyse de situations locales dans les régions d'intérêt du programme PIREN-Seine. Leur représentation dans la chaîne de modélisation des hydrosystèmes demandera une nécessaire adaptation de nos outils au caractère exceptionnel de ces événements et au contexte fortement anthropisé du bassin de la Seine.

Des scénarios hydroclimatiques originaux seront construits, fruits de nouvelles méthodologies élaborées au cours de cette phase, en particulier en matière de descente ou de remontée d'échelle, faisant dialoguer les échelles territoriales avec le bassin de la Seine dans sa globalité. Ils s'appuieront sur une compréhension renouvelée de la mécanique des aléas permise par leur intégration sur le long voire très long terme.

Les impacts de ces événements exceptionnels seront évalués en fonction des durées d'exposition à l'aléa et du temps de retour à la norme, en tenant également compte de tous les usages de l'eau, d'un point de vue tant quantitatif que qualitatif, en matière de ressource en eau et en énergie, en particulier lorsqu'il sera question de température de l'eau. Nous chercherons à comprendre la sensibilité des milieux séquanais au regard des caractéristiques du bassin de la Seine et de la gestion actuelle.

Enfin, afin d'intégrer les incertitudes dans la réflexion, nous présenterons l'inédit et ne négligerons aucun scénario. L'objectif sera de donner du poids au pire pour renforcer notre robustesse et ne pas accroître notre vulnérabilité. Nous interrogerons la fiabilité des modèles dans leur prise en compte des futurs événements extrêmes. Nous travaillerons ainsi à la concrétisation de la notion d'incertitude.

In fine, les travaux élaborés au sein de cet axe fourniront à l'ensemble des autres axes les bases quantitatives des évolutions hydrologiques et thermiques des territoires du bassin de la Seine, scénarisées selon les attendus émergeant des axes 2 à 4, dans une démarche de dialogue constructif. En particulier, l'analyse de la vulnérabilité hydrologique de quelques territoires spécifiques du bassin servira de base aux réflexions de l'axe 3 visant à mettre en avant des futurs désirables pour ces territoires. Le collectif acteur-chercheur de l'axe 3 pourra intervenir pour mobiliser les opérationnels du territoire. Un trait d'union entre les axes 1 et 2 sera établi autour du nexus eau-énergie-alimentation puisque les réflexions et résultats de l'axe sur la compréhension des vulnérabilités face aux aléas sécheresses et inondations pourront nourrir les réflexions de l'axe 2.

Les données produites dans le cadre des propositions d'action de cet axe auront vocation à être intégrées dans la stratégie globale d'ouverture des données du programme PIREN-Seine. Enfin, les choix en matière de restitution de nos travaux tout au long de la phase seront définis en amont et privilégieront, autant que faire se peut, la diversité des rendus possibles.

1.1.1 Visage climatique long terme du bassin de Paris

Cadre pluriannuel :

L'objectif principal est de reconstituer l'évolution paléoclimatique du bassin de Paris sur le très long terme, à l'échelle du Cénozoïque. L'accent sera plus particulièrement placé sur des périodes clés de cette histoire climatique, et notamment sur les périodes présentant des températures extrêmes. L'enjeu majeur est d'évaluer le contexte climatique dans le bassin de Paris au cours d'événements considérés comme des analogues des différents scénarios du GIEC au cours des prochaines années. Cette action reposera sur des données de paléotempérature nouvellement acquises et sur une synthèse de données obtenues au cours de différents projets récents. Même s'il faut bien considérer qu'il n'existe aucun analogue véritable du changement climatique en cours, du fait de la rapidité du phénomène que nous vivons actuellement et du fait des modifications paléogéographiques et paléocourantologiques qui en découlent, ces données permettront d'illustrer les caractéristiques climatiques que nous pourrions être amenés à connaître au cours des décennies et siècles à venir.

Le chantier principalement étudié dans ce projet sera l'Optimum Climatique de l'Éocène Inférieur (54-49 Ma). Il s'agit de la période la plus chaude du Cénozoïque avec un état stable du climat sur plusieurs millions d'années et des températures moyennes globales de 10 à 15 °C supérieures à l'actuel (Zachos et al., 2001). Cet optimum est envisagé comme l'analogue du scénario SSP5-8.5 proposé par le GIEC. Durant l'Éocène inférieur, les températures extrêmes associées à des concentrations en CO₂ pouvant atteindre les 1000 ppm impliquaient une absence de calotte polaire sur Terre. Ce réchauffement est bien documenté d'un point de vue global en domaine marin, mais il n'existe que très peu de données locales, en milieu littoral et continental pour le bassin de Paris. Ce projet vise à reconstituer les paléotempératures dans le bassin de Paris à partir de l'analyse géochimique ($\delta^{18}O$ et $\Delta 47$) de coquilles de mollusques marins et continentaux, ce qui permettra de contraindre notamment le gradient saisonnier de température.

La seconde période d'étude correspond à l'Oligocène inférieur (~30 Ma), qui correspond à la dernière incursion marine dans le bassin de Paris. Cette période se situe juste après la première glaciation pérenne du Cénozoïque avec l'établissement de la calotte antarctique. Les températures étaient malgré tout plus chaudes de 4 à 6 °C par rapport à l'actuel, avec des concentrations en CO₂ atmosphérique supérieures à 600 ppm. Là aussi des coquilles de mollusques, échantillonnées dans les formations sableuses du bassin de Paris (sables de Fontainebleau), seront analysées dans le but de contraindre les paléotempératures.

Une synthèse de données existantes sur d'autres périodes de réchauffements sera effectuée, dont l'optimum climatique de l'Éocène moyen (40 Ma), qui correspond à un réchauffement bref (500 ka) des températures moyennes annuelles de +4 à +6 °C et qui a été récemment caractérisé dans le bassin de Paris. Enfin, des données obtenues sur des périodes plus récentes (Holocène), dans d'anciens chenaux de la Seine dans la plaine de la Bassée, seront mises en perspective des résultats obtenus pour les périodes plus anciennes.

Programme 2025 - 2026 :

Les deux premières années seront consacrées à l'étude de terrain afin de collecter les fossiles qui serviront de support de l'information paléoclimatique. Cette étude de terrain servira également à caractériser les paléoenvironnements à partir de l'analyse des dépôts sédimentaires. Une fois les fossiles échantillonnés, ceux-ci seront analysés en laboratoire, en vue d'effectuer des analyses géochimiques (cathodoluminescence, $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$, $\Delta 47$).

En parallèle de ces études de terrain et de laboratoire, un gros travail bibliographique sera nécessaire pour synthétiser les données existantes sur l'évolution paléoclimatique du bassin de Paris.



Année 1 : étude bibliographique et début de l'étude de terrain et de l'échantillonnage des fossiles pour l'Optimum Climatique de l'Éocène Inférieur.

Année 2 : analyses géochimiques des fossiles en laboratoire. Terrain et échantillonnage des dépôts d'âge Oligocène.

Co-financement :

Une bourse de thèse (contrat doctoral) a été acceptée pour débiter en octobre 2024 au centre de Géosciences de Mines Paris.

Des sujets de stage seront également proposés dans le cadre du trimestre de recherche des élèves de 2e année de l'École des Mines.

1.1.2 Caractérisation des aléas hydroclimatiques depuis le XIXe siècle

Cadre pluriannuel :

À l'échelle séculaire et dans un passé plus proche, l'analyse des événements hydrologiques depuis le XIXe siècle, tels qu'ils peuvent être reconstitués à partir des observations ou modélisés, nous renseignera premièrement sur la capacité de la plateforme CaWaQS-Seine à en rendre compte, dans un souci d'amélioration de la représentation des processus associés aux événements extrêmes dans le modèle. D'autre part, cette approche rétrospective contribuera à la compréhension de la vulnérabilité des milieux et territoires séquanais dans un cadre connu.

Analyse d'événements hydrologiques passés

Les travaux de reconstitution des séquences hydroclimatiques historiques proposés par Bonnet et al. (2020) seront mobilisés pour explorer d'une part les événements extrêmes identifiables depuis la seconde moitié du XIXe siècle et d'autre part, utilisés en entrée du modèle CaWaQS-Seine, afin d'évaluer les événements hydrologiques passés, notamment en matière d'aléa à l'échelle des territoires du bassin et la capacité du modèle à les représenter.

Un travail de digitalisation des données hydrologiques passées sera réalisé en parallèle avec le concours de l'EPTB Seine Grands Lacs, qui concernera les données limnimétriques et hydrométriques journalières compilées par le Service de navigation de la Seine depuis 1830 et le Service hydrométrique du bassin de la Seine depuis 1854, ainsi que les données pluviométriques journalières compilées par les commissions départementales météorologiques du bassin de la Seine et Météo-France. Cette base de données servira également à qualifier les aléas passés, mais aussi de point de comparaison pour les résultats de modélisation obtenus avec la plateforme de modélisation CaWaQS. Il sera alors possible de mieux évaluer les vulnérabilités du bassin à des événements passés, que ce soit par exemple la période sèche du milieu du XIXe siècle ou les inondations majeures de juillet 2021 en Europe de l'Ouest.

Représentation des processus

Les travaux de la phase 8 ont permis d'aboutir à un modèle CaWaQS-Seine très performant en moyenne pluriannuelle (Flipo et al. 2023). Cependant, en situation extrême de crue ou de sécheresse, des imperfections demeurent. Nous nous attacherons à améliorer les mécanismes de genèse des crues par le modèle hydrologique et la quantification de l'évapotranspiration en période de sécheresse. Le premier mécanisme sera étudié plus spécifiquement sur le bassin du Loing, le second dans le territoire de la Bassée (bloc 1.1.5).

La dynamique de l'interface nappe-rivière sera améliorée. Elle est importante pour la bonne représentation des dynamiques de débordement en lit majeur ainsi que pour la prise en compte de

l'anthropisation de la rivière (impact des ouvrages de navigation). Afin d'intégrer ces éléments dans CaWaQS pour le réseau principal, nous travaillerons en relation étroite avec Seine Grands Lacs qui dispose de modèles hydrauliques des principales rivières du bassin en amont de la confluence Seine/Oise. Ces modèles seront synthétisés sous la forme de courbes de tarage niveau/débit en chaque point des rivières simulées.

Finalement, l'empreinte de l'homme sur le fonctionnement du système sera également mieux intégrée dans la plateforme de simulation CaWaQS via le calcul de pompes souterraines effectifs au regard d'une demande en eau qui deviendra un forçage du système. Il sera ainsi possible de mieux évaluer les impacts du changement climatique sur les usages de l'eau souterraine. Les règles de gestion des barrages-réservoirs seront également implantées dans CaWaQS à des fins prospectives.

Programme 2025 – 2026 :

Pendant les deux premières années de la phase, nous travaillerons sur l'amélioration de la genèse des crues en relation avec la modélisation des crues du bassin du Loing avec CaWaQS qui aboutira à une évolution du schéma conceptuel de surface de l'outil. Un transfert à l'échelle du bassin de la Seine pourra ainsi être réalisé.

Co-financement :

Ce volet bénéficie de nombreux co-financements actés ou en attente :

- Thèse CIFRE de Lise-Marie Girod financée par l'EPAGE du Loing depuis novembre 2022, encadrée par Mines Paris - PSL, pour évaluer le rôle des eaux souterraines dans la genèse des crues du bassin
- Demande de financement ADEME Innov'Eau et thèse CIFRE avec ANTEA Group sur le développement de la nouvelle génération du modèle CaWaQS multi-échelle
- CPIER en construction sur le stockage des eaux par les berges en période de crue

1.1.3 Scénarisation des aléas hydroclimatiques dans le bassin de la Seine et ses territoires

Cadre pluriannuel :

Nous nous attacherons à scénariser les aléas hydroclimatiques dans le bassin de la Seine avant de les décliner régionalement. L'évaluation fine de la sensibilité du territoire aux aléas hydrologiques affectés par le changement climatique suppose l'établissement de scénarios hydroclimatiques rendant compte des événements exceptionnels à venir à différentes échelles temporelles et spatiales et leur analyse critique, notamment du point de vue des incertitudes associées.

En matière de climat, les 12 scénarios issus de l'exercice CMIP6 qui ont été désagrégés en phase 8, associés aux travaux de régionalisation climatique d'Explore2 (Marson et al. 2024), constituent le point de départ de ce travail. Le modèle CaWaQS-Seine, qui permet de représenter 7 000 km de rivières et l'ensemble du système aquifère du bassin de la Seine, est le maillon hydrologique de la chaîne d'outils hydroclimatiques qui va permettre d'aborder les impacts du changement climatique dans les territoires, jusqu'aux têtes de bassin.

Scénarisation de séquences climatiques critiques

Nous développerons une méthodologie pour générer des séquences critiques, en nous concentrant sur les crues et les sécheresses pluriannuelles, notamment les sécheresses hivernales. Des approches



hybrides seront envisagées pour intégrer les extrêmes dans les méthodes de scénarisation, en explorant des membres CMIP6 apportant des réponses plus marquées sur ce type d'événements. La méthodologie qui sera développée sera capable soit de répliquer ces périodes directement dans des séquences existantes soit de les synthétiser mathématiquement pour ensuite les simuler. Une méthodologie de mise à l'échelle spatiale du bassin de la Seine sera également développée, soit en suivant les approches déjà développées en phase 8, soit en rejouant des états des modèles de circulation générale avec des modèles météorologiques à haute résolution.

Finesse de résolution spatiotemporelle jusqu'aux territoires

Pour évaluer plus finement les impacts du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique des territoires, y compris les têtes de bassin, une méthode de descente d'échelle à haute résolution spatiale des forçages SAFRAN et des scénarios hydroclimatiques sera également proposée, et une méthode d'emboîtement d'échelle développée dans CaWaQS pour simuler le fonctionnement d'un territoire en cohérence avec son bassin versant régional.

Pour répondre à des questions nécessitant une résolution temporelle plus fine, notamment en relation avec le couvert végétal, une descente d'échelle des scénarios hydroclimatiques journaliers construits en phase 8 sera mise en œuvre pour les décliner à une résolution horaire.

Caractériser les incertitudes hydroclimatiques

Des travaux seront menés afin de caractériser les incertitudes hydroclimatiques. Ils consisteront à évaluer l'influence de la variabilité interne du climat dans les forçages hydroclimatiques, en appréciant notamment l'effet de l'initialisation des modélisations hydroclimatiques. Les incertitudes liées aux méthodes de désagrégation seront également qualifiées. Une méthodologie de perturbation des amplitudes des signaux de pluie et d'évapotranspiration potentielle (ETP) sera également mise en œuvre pour simuler des incertitudes, ce qui nécessitera en amont un travail de caractérisation de la cohérence climatique des champs désagrégés.

Évaluation des impacts

Une caractérisation de l'évolution de l'aléa en fonction des scénarios de changement climatique sera formalisée sous forme de probabilités de survenue d'un événement donné à différentes échéances temporelles, mi-siècle et fin de siècle. Couplée à des cartographies de situations moyennes de la piézométrie des aquifères, des débits moyens, d'étiage et de crue, elle devrait permettre de caractériser les risques de défaillance du socio-hydrosystème à répondre aux différentes attentes en matière d'usages de l'eau.

Programme 2025 – 2026 :

Les différentes étapes seront menées en parallèle au cours de la phase. Cependant, une première étape de travail consistera à faire dialoguer, à l'échelle du bassin de la Seine, les approches de scénarisation climatique développées par le PIREN-Seine en phase 8 et celles mises en œuvre dans le cadre du projet Explore2. À cet effet, une analyse des différents scénarios climatiques issus de CMIP5 et CMIP6 sera effectuée, ainsi que des méthodes de mise à l'échelle dans le bassin de la Seine. Il s'agira notamment de comprendre les mécanismes à l'origine d'éventuelles différences entre les projections hydrologiques issues des différents exercices pour mieux en évaluer le réalisme respectif. D'autre part, certains scénarios Explore2 seront rejoués avec CaWaQS-Seine afin de positionner ce modèle hydrologique-hydrogéologique, représentant explicitement la dynamique des eaux souterraines en s'appuyant sur la physique, dans la galaxie des modèles mobilisés par Explore2, dont la nécessaire généralité à l'échelle nationale ne permet pas de représenter les processus physiques et les territoires avec une résolution aussi fine que celle de CaWaQS-Seine.

De même, les simulations réalisées en parallèle à l'aide du schéma de surface ORCHIDEE seront comparées aux simulations de CaWaQS-Seine à l'actuel et sous l'effet des scénarios hydroclimatiques développés en phase 8 du PIREN-Seine. Cela permettra d'une part de mettre en relation plus étroite

ces deux actions du PIREN-Seine via une comparaison des deux modèles de référence et d'autre part, de mieux comprendre les écarts entre eux afin d'améliorer le couplage ORCHIDEE-CaWaQS qui sera mobilisé pour évaluer les impacts des changements globaux (climat, usage des sols) sur le fonctionnement hydrologique du bassin et sur les flux de chaleur (cf. bloc 1.1.3) en seconde partie de phase.

Le rôle de la variabilité interne climatique dans les incertitudes des projections hydroclimatiques sur le bassin de la Seine pour les prochaines décennies sera étudié en détail, avec un focus sur les sécheresses et les débits intenses. Il s'agira notamment de dégager les trajectoires potentielles menant aux risques les plus importants. Ces travaux se baseront notamment sur de larges ensembles de projections climatiques différant uniquement par l'initialisation, croisées avec les projections hydrologiques sur le bassin réalisées en phase 8. Par ailleurs, dans la continuité des expériences de perturbation des entrées climatiques de CaWaQS par traitement du signal, effectuées dans la phase 8 en lien avec le projet AquiVar de l'AESN, une approche similaire sera expérimentée pour les sorties climatiques CMIP fin de siècle désagrégées à utiliser en entrée du modèle CaWaQS. L'objectif ici est d'explorer une démarche complémentaire d'estimation de l'impact de la possible non-restitution des variabilités interannuelles et plus basse fréquence dans les signaux climatiques d'entrée en matière d'incertitude sur les projections hydroclimatiques réalisées, concernant notamment les extrêmes.

Parallèlement à ces évolutions du modèle hydrologique, les forçages hydroclimatiques seront affinés en matière de caractérisation des incertitudes, ainsi qu'en matière de résolutions spatiales et temporelles aussi bien à l'échelle du bassin que dans des territoires spécifiques, notamment dans les têtes de bassins ou vallées, lieux d'effets de relief importants.

Co-financement :

Ce volet bénéficie de nombreux co-financements actés ou en attente :

- Thèse de Juliette Deman au CECI/Cerfacs (contrat doctoral démarré en octobre 2022) sur les incertitudes des projections hydrologiques en Europe
- Demande de thèse Région Normandie/BRGM au M2C sur la simulation et les scénarisations hydrogéologiques par IA sur la France métropolitaine dans le cadre du projet PEPR OneWater DEESAC, renfort potentiel des projets AESN PYCARO et ICARE (1 thèse et 1 postdoc qui pourront contribuer à développer le volet sur la perturbation des sorties hydroclimatiques CMIP, volet non directement traité dans les projets PYCARO et ICARE)
- Demande de financement ADEME Innov'Eau et thèse CIFRE avec ANTEA Group sur le développement de la nouvelle génération du modèle CaWaQS multi-échelle

Co-financement :

Le travail sera mené en collaboration avec le GIS ORACLE et l'IR OZCAR qui financent une partie importante des suivis pérenne et haute fréquence.

1.1.4 Évolution des températures de l'hydrosystème Seine face à l'augmentation des usages anthropiques et de la température de l'air

Cadre pluriannuel :

Les usages de l'hydrosystème Seine par les acteurs de l'énergie et de l'eau sont multiples. Les différents compartiments de l'hydrosystème couvrent la production d'énergie géothermique dite de minime importance (GMI) incluant le refroidissement, mais également la production d'eau potable, pour



l'irrigation et l'industrie, tout en étant essentiels au maintien des écosystèmes aquatiques et à l'adaptation humaine face aux changements globaux. Ces changements incluent une augmentation des usages anthropiques de l'eau, dans un contexte d'urbanisation croissante, mais aussi dans celui de la transition énergétique dans laquelle la France s'inscrit, synonyme de besoins accrus en énergie décarbonée. La Programmation pluriannuelle de l'énergie à l'horizon 2028 prévoit en particulier une augmentation de la production d'énergie issue de la géothermie de surface de plus de 50 % par rapport à 2020 (source ADEME : clés pour agir [012221-1]) et vise 10 TWh en 2033, soit le double de la production actuelle.

Du point de vue thermique, les usages de l'hydrosystème Seine par les différents acteurs interfèrent. S'y superposent variations et dérive climatiques. À l'échelle du bassin de la Seine et à l'horizon 2100, les scénarios de changement climatique RCP (*Representative Concentration Pathways*) initiés par le GIEC prévoient tous un réchauffement de la température moyenne de l'air. À l'échelle du bassin de la Seine, celle-ci pourrait croître de 3,5 °C, voire dépasser +4,4 °C en Île-de-France.

Or la température est un paramètre clé non seulement du comportement et de la qualité des eaux, mais aussi du potentiel géothermique. Elle est un indicateur des conditions de recharge, des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines et du flux thermique dans les aquifères. Elle contrôle les réactions biogéochimiques, la solubilité de l'oxygène, la dissolution des carbonates et du gypse, l'activité bactérienne et régit l'évolution de la faune et de la flore. La température représente ainsi un critère de qualité intrinsèque et est réglementée tant pour les eaux destinées à la consommation humaine (EDCH) que pour la protection de l'environnement (DCE).

Pour autant, les conséquences thermiques des usages de l'eau n'ont jamais été étudiées à l'échelle d'un vaste bassin et sur le long terme, bien que des conflits potentiels d'usage de la ressource en eau et en énergie apparaissent. En parallèle des travaux sur la quantification de la ressource en eau, la connaissance de l'état thermique des hydrosystèmes est devenue primordiale pour obtenir une gestion efficace limitant les compétitions entre les usages en encourageant la coopération.

L'objectif global de ce volet thermique est d'améliorer la connaissance de l'évolution spatiotemporelle passée, actuelle et future de la température des eaux de l'hydrosystème Seine, afin de proposer une aide à la décision aux différents acteurs, que ce soit pour la production d'eau, l'utilisation de l'énergie (rafraîchissement, chaleur), le maintien des usages pendant les périodes extrêmes (crues, sécheresses et canicules), les aménagements du territoire ou la protection de l'environnement, en prenant en compte les facteurs de changement.

Pour ce faire, il est essentiel de disposer de données de température et d'usages de l'eau, unifiées à l'échelle du bassin. Une telle base existe déjà pour les températures des eaux de surface à l'échelle nationale grâce au projet TIGRE financé par l'OFB ainsi qu'à l'échelle du bassin de la Seine (Rivière et al., 2023). Elle doit être complétée pour ce qui est des températures des aquifères et de leurs usages en Normandie et en Île-de-France dans le cadre d'un projet soumis en réponse à l'appel à manifestation d'intérêt du Contrat de Plan Interrégional Etat-Régions (CPIER) de la Vallée de la Seine. L'analyse de ces données, sous forme cartographique et de métriques utiles aux acteurs de l'eau et du territoire, permettra de dresser un état des lieux quantitatif du territoire en vue d'une caractérisation ultérieure de l'impact du changement climatique à venir.

Ces données seront également utiles à la validation des développements récents dont a fait l'objet la plateforme de modélisation hydrothermique pendant la phase 8 du PIREN-Seine (Kiliç, 2022), et ce, aussi bien du point de vue des processus pris en compte que de l'estimation des paramètres hydrothermiques. Cette plateforme couple le code CaWaQS avec le schéma de surface ORCHIDEE. Les performances de la plateforme hydrothermique doivent aussi être améliorées par une meilleure prise en compte à l'échelle régionale du bassin de la Seine des différents usages thermiques en rivière et en aquifère proche surface (< 200 m de profondeur), des échanges nappe-rivière ainsi que de l'impact des îlots de chaleur. Doivent être intégrés en particulier la dynamique des prélèvements (AEP, AEI) en nappe, les recharges artificielles ou encore les installations géothermiques. Leur représentation physique nécessitant une approche de modélisation locale, ce point requiert le développement d'une

méthodologie de changement d'échelle par emboîtement. Les influences des différents usages sur la température de l'eau seront alors analysées, ainsi que leur potentiel de compétition.

Ces étapes seront cruciales et permettront de quantifier des incertitudes sur les températures simulées, nous assurant de la robustesse des méthodes développées au cours de la phase 8. À terme, la plateforme sera ainsi en mesure de simuler l'évolution de la température des eaux souterraines et des eaux de surface à l'échelle du bassin de la Seine et de produire des scénarios d'adaptation tenant compte des besoins évolutifs liés aux activités humaines et au changement climatique. Ceux-ci seront définis en collaboration avec les acteurs du secteur en lien avec les travaux de l'axe 2 et utiliseront les scénarisations hydroclimatiques provenant du bloc 1.1.3.

Enfin, les chroniques de température observées et prévisionnelles seront intégrées dans un même outil cartographique de visualisation afin de fournir des éléments d'aide à la décision pour les acteurs en matière de production d'eau, d'utilisation de l'énergie (rafraîchissement, chaleur), d'aménagement du territoire et de protection de l'environnement, en tenant compte des facteurs de changements globaux.

Programme 2025 – 2026 :

Les deux premières années seront consacrées à l'établissement de la base de données thermiques et sa mise en ligne ainsi qu'à la modélisation locale de sites définis comme prioritaires.

Un comité technique sera mis en place afin de collecter les données de température en aquifère et pour déterminer les métriques nécessaires au maintien des activités des différents partenaires. Une analyse spatiotemporelle de la température sera alors réalisée afin d'en déterminer les facteurs de contrôle. Ces tâches sont dépendantes de l'obtention du financement du CPIER Vallée de la Seine.

Des simulations à fine échelle des usages thermiques seront réalisées en parallèle sur des sites du bassin de la Seine où des données existent, puis répétées chaque année (de 2025 à 2028). Cet effort de modélisation permettra de quantifier localement l'impact de ces usages, mais alimentera également une réflexion sur la méthode de changement d'échelle à opérer afin de réaliser la modélisation régionale avec la plateforme hydrothermique.

Co-financement :

CPIER ADEME Vallée de la Seine (650 000 €) : « Répondre aux enjeux socio-économiques et environnementaux liés à la température des eaux souterraines face aux changements globaux ». Coordination Agnès Rivière, Mines Paris. Collaboration Mines Paris, BRGM, Metis. Soumis en février 2024, réponse attendue en septembre 2024.

1.1.5 Déclinaison aux échelles territoriales : le cas de la Bassée

Cadre pluriannuel :

Les territoires du Loing et de la Bassée font l'objet d'un travail spécifique s'inscrivant dans la dynamique initiée au PIREN-Seine de dialogue entre les échelles territoriales et régionales, le premier pour l'étude ciblée des mécanismes de genèse des crues (bloc 1.1.2), le second au sujet des sécheresses. Nous détaillons ici les actions proposées pour la Bassée.

Compte tenu des forts enjeux associés au futur de la ressource en eau dans cette zone humide dans un contexte de changement global et des efforts déployés jusqu'à présent dans le cadre du PIREN-Seine dans cette plaine, nous proposons une action ciblée autour de l'estimation de sa sensibilité aux sécheresses prolongées qui s'annoncent. Ce territoire nous offrira l'opportunité de décliner à l'échelle



régionale quelques-unes des actions déjà inscrites à l'échelle du bassin de la Seine et de les associer plus étroitement à leur pendant sociétal.

Les sécheresses laissent une marque beaucoup plus persistante sur les écoulements souterrains que les inondations en raison d'un système plus faiblement dissipatif à l'étiage que nous chercherons à caractériser. Nous utiliserons les outils de modélisation classiques du PIREN-Seine et bénéficierons du système d'emboîtement de la plaine au sein du bassin de la Seine permis par la plateforme de simulation des hydrosystèmes CaWaQS. Nous souhaitons également développer l'utilisation de données satellitaires à l'échelle régionale, désormais permise par l'existence de nouveaux jeux de résolution plus fine, par exemple les hauteurs d'eau délivrées par le satellite SWOT. Nous poursuivrons bien sûr en parallèle l'indispensable suivi in situ des niveaux d'eau dans la plaine, dont les séries se doivent d'être prolongées.

La consolidation de l'outil numérique, à des fins de simulation plus fiable en période sèche, sera notre premier objectif, centré sur l'estimation par le modèle de l'évapotranspiration. Les contraintes supplémentaires apportées par les données satellitaires permettront de renforcer la robustesse de notre évaluation des flux échangés par le compartiment souterrain comme des profondeurs de nappe à l'étiage. Ces dernières seront mises en relation avec leur environnement, qu'il s'agisse des influences anthropiques, en particulier en matière de régulation du cours de la Seine, comme des écosystèmes qui en dépendent. Sur ce point, nous nous attacherons à décrire l'évolution du couvert végétal au cours du temps, tirant parti des archives satellitaires et réfléchirons aux liens entre forçages anthropiques et climatiques sur le devenir de la végétation.

Les simulations pourront alors être avantageusement prolongées dans le futur, à l'aide des scénarios à fine résolution établis dans le cadre de la phase 9 (bloc 1.1.3), afin d'évaluer l'empreinte de sécheresses prolongées, en fonction de leur durée et de leurs répétitions, et d'en déduire les capacités de résilience de la plaine. Des avancées pratiques sont attendues en matière de compréhension des impacts de la sécheresse à long terme sur les niveaux piézométriques et le débit de base, du potentiel du système aquifère à les atténuer et des solutions d'adaptation à prévoir en conséquence.

Notre programme suppose une collaboration avec de nombreux acteurs impliqués dans le PIREN-Seine et dans la Bassée : Seine Grands Lacs, Voies Navigables de France, Syndicat Départemental des Eaux de l'Aube, Réserve naturelle de la Bassée et Association Nature du Nogentais.

Programme 2025 – 2026 :

Au cours des deux premières années, nous mettrons en place les outils nécessaires à l'évaluation de la sensibilité de la plaine vis-à-vis des sécheresses. Un premier point concernera la quantification des termes du bilan hydrologique, qui doit être améliorée dans le schéma de surface du modèle CaWaQS du point de vue du calcul de l'évapotranspiration en période d'étiage. Nous nous appuierons pour ce faire sur une analyse comparative avec des estimations dérivées de produits satellitaires, telles que MOD16 ou GLEAM à une résolution plus grossière, mais aussi issues de la mise en œuvre de schémas de surface sol-végétation-atmosphère, ORCHIDEE par exemple, ou encore d'après des méthodes alternatives fondées sur l'analyse des fluctuations piézométriques. Dans un second temps, nous emploierons de nouveau les données satellitaires, nous appuyant d'une part sur les archives disponibles, éventuellement complétées de l'inventaire numérique de l'occupation du sol de l'Île-de-France (Mos), pour reconstituer la dynamique de la végétation dans la plaine. Nous pourrions alors nous interroger en particulier sur les liens entre végétation, évapotranspiration et profondeur de nappe. Nous comptons d'autre part mettre à profit les données les plus récentes de hauteur d'eau fournies par le satellite SWOT sur les gravières, comme indicateur de l'état général des nappes, notamment à l'étiage. Une campagne éclair de suivi in situ concomitante au passage du satellite sera prévue à des fins de validation.

BLOC 1.2. Gestion des risques et adaptation(s) : réflexivité des territoires et acteurs face aux aléas et leurs vulnérabilités

Une fois que les aléas et les vulnérabilités aux événements hydroclimatiques, exerçant une influence marquée, identifiés et caractérisés, des solutions d'adaptation collectives seront proposées.

De nombreuses solutions pourront être testées dans ce cadre, d'abord d'un point de vue physique, à l'aide de nos outils de modélisation et d'expériences, ou retours d'expériences, réalisées in situ. Parmi ces solutions, nous envisagerons notamment la végétalisation des ripisylves en tête de bassin, l'agroforesterie, la renaturation des plaines alluviales, la restauration des zones humides, la réinfiltration active comme passive en nappe, l'interception du ruissellement en période de fortes précipitations et/ou de hauts débits, l'adaptation des pratiques agricoles tenant compte des périodes de forte infiltration.

Nous privilégierons les échelles locales pour des solutions à taille humaine et en cohérence hydrologique et réglementaire, c'est-à-dire intégrées dans le linéaire amont-aval et solidaires. D'un point de vue temporel, nous travaillerons aussi bien sur le temps court de la crise que sur le temps long qui exige l'anticipation et sur le moyen terme qui permet une projection des acteurs. La modélisation jouera de nouveau un rôle majeur dans ce travail afin de fournir des éléments quantitatifs ainsi qu'une base de dialogue entre les acteurs des territoires en garantissant une cohérence générale entre échelles locale et régionale. Pour instaurer une gouvernance cohérente permettant à chaque acteur de se sentir concerné et de s'investir, nous passerons par la création de récits scénarisés. Le déploiement de tels récits a vocation à s'appuyer sur les trajectoires passées et actuelles, à stimuler l'émergence de dispositifs innovants aptes à anticiper les inondations/les sécheresses, à répartir la ressource en eau de manière équilibrée et à promouvoir la sobriété. Ce travail sera réalisé en grande partie dans les actions citées dans le bloc 1.1. Toutefois dans ce deuxième bloc nous aurons des actions plus ciblées pour appréhender comment le risque d'inondation a été un objet d'interpellation et de négociations avec les pouvoirs publics par les industriels au XIXe et XXe siècle d'une part, et comment aujourd'hui sont appréhendées les solutions fondées sur la nature.

1.2.1 Les industries et le risque inondation en vallée de Seine. Approche historique (1815-1975)

Cadre pluriannuel :

L'objectif de cette action est de documenter comment les industriels installés depuis la première révolution industrielle en bord de Seine ont appréhendé et géré le risque inondation inhérent à l'emplacement de leurs usines. Cette installation en bord de rivière était motivée par la facilité de transport des pondéreux, et est à l'origine des grands travaux d'aménagements de la Seine pour en améliorer la navigation à partir de 1837. Le travail s'appuiera sur un inventaire des industries en bord de Seine entre Marcilly et Poses réalisés en 2011 par Simona Georgescu (M2 UPMC). Les industriels n'ayant pas l'obligation de conserver leurs archives¹, il conviendra d'utiliser des sources administratives. Le travail consistera à rechercher dans les archives des établissements (installations) classés (aux archives départementales) toutes les références à un événement de montée des eaux.

¹ Néanmoins, est prévu un passage aux archives du monde du travail à Roubaix pour analyser des dossiers d'entreprises d'intérêt national dont les archives ont été conservées.



Une autre source sera de dépouiller les rapports des conseils généraux des départements de l'Aube à la Seine-Maritime pour identifier des événements ayant spécifiquement impacté des industriels. Une recherche dans les journaux locaux en ligne sur Gallica ou ReTronews sera également envisagée, en complément du travail déjà effectué par Seine Grands Lacs (site episeine.fr/histoire-des-crues). Enfin, les dossiers constitués lors des grandes inondations des XIXe et XXe siècles aux archives nationales ou relatés dans les débats parlementaires seront analysés. Il est difficile de s'engager en ce début de projet sur les rendus possibles, car il est probable que les informations seront très parcellaires. On recherchera en priorité les dits des industriels, mais aussi les démarches qu'ils ont pu effectuer auprès de l'administration en cas de dégâts majeurs, ainsi que le contenu des réponses de l'administration.

Programme 2025 – 2026 :

Les deux premières années seront consacrées aux travaux de dépouillement des archives. Si des dossiers conséquents sont repérés, il sera envisagé un travail d'analyse de contenu par un ou deux M2 en deuxième partie de phase.

1.2.2 Trajectoires d'adaptation via solutions fondées sur la nature – Seine amont

Cadre pluriannuel :

Depuis plus d'un siècle, le territoire de la Seine amont fait l'objet d'une vigilance particulière afin de réguler son débit, de maîtriser les crues et de pouvoir diminuer l'occurrence d'étiages sévères : des ouvrages ont été mis en place (des différents barrages-réservoirs construits tout au long du XXe siècle jusqu'au bassin de surstockage en cours de réalisation en Seine-et-Marne). Ces aménagements, les débats et compensations qu'ils ont occasionnés, leurs impacts ont été étudiés par différentes études, notamment au sein du PIREN-Seine. Ils sont d'une certaine manière la marque d'une perpétuation et d'une pérennité d'une vision défensive face à l'aléa. Au demeurant, comme l'ont illustré de nombreux travaux, d'autres doctrines opérationnelles sont aujourd'hui à l'œuvre à la fois pour travailler sur le volet résilience des territoires face à des phénomènes récurrents, mais aussi pour faire face à l'érosion de la biodiversité et au changement climatique. À ce titre, les solutions fondées sur la nature (SFN) sont-elles de plus en plus prônées par les pouvoirs publics et fédèrent un certain nombre d'acteurs (institutions comme des organisations internationales telles que l'Union Internationale de la Conservation de la Nature des Nations Unies, comme des services de l'État tel que l'Office français de la Biodiversité, des associations environnementales telles que France Nature Environnement, des organismes de recherche telle que l'INRAE, etc.) (Guerrin et al., 2023). Elles font l'objet d'un certain nombre de politiques d'incitation (information des collectivités locales, financement des agences de l'eau). Elles prennent différentes formes : restauration de zones humides, de rivières, reméandrages (restauration de la continuité longitudinale) (cf. travaux de Marie-Anne Germaine sur différents terrains), restauration (ou création) de zones d'expansion de crue (on compte 130 projets de ZEC en cours dans le bassin amont de Seine).

Dans le contexte actuel de changement climatique, qui instaure un nouveau régime de prise en compte du risque tout en augmentant certaines incertitudes et par-là même difficultés à décider et au regard des travaux des chercheurs et des modélisations mises en œuvre, comment sont positionnées et « reçues » ces « infrastructures douces » sur les territoires de Seine amont, sachant l'habitude d'une Seine régulée par de grands ouvrages ? Font-elles d'ailleurs l'objet d'un maillage afin de comprendre leurs effets à des échelles micro, méso- et macro spatiales (échelle du bassin) ? Constituent-elles une solution d'adaptation et comment les insérer à la fois dans ce contexte particulier, mais aussi dans un ensemble d'outils à la main des décideurs publics et des usagers ?

Il s'agira de comprendre la diversité des appréhensions de ces ouvrages et comment ils percutent des manières d'utiliser et de se représenter le fleuve et l'eau (perte de certains usages, ré-ensauvagement, etc.). En cela, les collectifs d'acteurs associés à la définition des projets seront étudiés afin de comprendre qui est associé à la définition de ces « nouveaux aménagements », qu'elle est la place des habitants, des usagers dans la structuration des projets. Dans le même temps, les enquêtes permettront de déterminer comment ces SFN s'inscrivent dans une histoire (récente ou plus longue) parfois tendue entre les acteurs et quelles sont les négociations à l'œuvre et sur quels objets se tissent les compromis.

Plus généralement, l'objectif sera d'étudier la manière dont les SFN diminuent la vulnérabilité des territoires de Seine amont face aux risques d'inondation principalement : il s'agit de mieux appréhender les enjeux politiques des soLiDARités territoriales (dans la suite de ce qui a été exploré lors du programme 8).

- Il faudra notamment explorer si elles induisent un rapport renouvelé aux aléas ou constituent un outil complémentaire à une vision défensive. Comment les *soft infrastructures* se combinent-elles aux infrastructures plus impactantes ? À quoi répondent-elles réellement ?
- Permettent-elles de rebattre les cartes des rapports territoriaux avec une construction plus territorialisée des projets (malgré tout de même un certain nombre d'injonctions qui existent) ? Permettent-elles de redonner du pouvoir aux acteurs locaux dans la définition de leurs futurs à proximité de la Seine ? À quelles autres actions peuvent-elles être combinées ?
- Comment participent-elles à repenser la gestion des risques à l'échelle des territoires où elles se situent ?

Programme 2025 – 2026 :

- Travail d'identification des SFN en Seine amont (existants ou en cours de structuration), des parties prenantes (maîtres d'ouvrage, propriétaires des parcelles, usagers) et des fonctionnalités qu'on cherche à retrouver et définition d'une cartographie des initiatives, des acteurs impliqués, des problématiques rencontrées (en lien avec les collectivités, Life Artisan, etc.)
- Sélection de trois projets très distincts pour en étudier le potentiel en matière de représentations face à l'aléa et de redéfinition des soLiDARités et rapports de pouvoir (préparation d'un terrain d'étude qualitatif et des acteurs à rencontrer).
- Structuration d'un séminaire d'échanges entre chercheurs et acteurs sur les SFN et/ou opérations de renaturation/restauration (pour approfondir les questionnements suscités).

2. Axe 2 : Les flux de matières dans les filières et leurs impacts territoriaux

Les productions agricoles et industrielles pour l'alimentation, la construction, le transport, le logement et l'énergie sont raisonnées à l'échelle de filières sans intégrer systématiquement l'impact de ces choix sur les paysages, la biodiversité, la qualité et la quantité d'eau du bassin de la Seine. Des bilans matières et des évolutions de modèles de production et de consommation ont été étudiés pour l'alimentation, mais il reste à analyser leurs interdépendances à des filières amont et aval et aux aides publiques. Des bilans territorialisés restent également à établir pour les matières plastiques et les matériaux de construction et les flux de contaminants. Il s'agit également de comprendre quelles contraintes orientent les filières qui génèrent ces flux et quels leviers de politiques publiques sont mobilisables pour modifier leurs impacts. Cet axe vise à mieux caractériser les modèles technicoéconomiques de ces filières, les flux de matière qu'ils induisent en fonction de leur production et de leurs usages et leurs impacts territoriaux.

Les approches combinent les outils suivants :

- Typologie socio-économique de modèles de production par filière et analyse de leurs dépendances en matière d'approvisionnement, d'emploi, d'investissement et de commercialisation
- Analyse des débats prospectifs dans les filières de l'énergie, de l'urbanisme, de l'agro-alimentaire, des plastiques et des contaminants
- Enquête sociologique sur les pratiques de consommation
- Mesure *in situ* de résidus ou d'impacts dans l'eau ou dans des carottes sédimentaires pour mieux comprendre les bilans et leur répartition

BLOC 2.1. Atelier « Grain à moudre » pour le PIREN-Seine

Les filières pouvant impacter le bassin étant multiples, les compétences pour les étudier n'ont pas pu être toutes réunies au sein du programme. Ce bloc vise à organiser des ateliers réguliers (2 h toutes les 6 semaines) pour créer une communauté de réflexion (de chercheurs et de gestionnaires) à partir de travaux menés hors du PIREN-Seine sur des filières ou secteurs pouvant avoir un fort impact sur l'eau, pour identifier les questions qu'ils soulèvent et qui peuvent être traitées dans ce programme.

Il s'agit de faire venir des intervenants proposant des approches innovantes pour penser la territorialisation des activités (énergie, construction, plastiques, contaminants, transports) sur le bassin de la Seine et leurs impacts sur l'eau.

Programme 2025 – 2026 :

Les séances suivantes ont déjà été identifiées

- Pratiques agricoles et réglementations en faveur des haies. Analyse sociologique de la mise en œuvre de la PAC 2023-2027
- Recyclage des papiers et cartons : Impacts carbone sur la filière forêt-bois
- Plastiques alimentaires
- Antibiotiques et alternatives

- Filière des analyses chimiques et environnementales
- Secteur assurantiel
- Distribution et marché d'intérêt national (Rungis Nord)
- Transport massifié par barges
- Hydrogène dans le domaine du transport

BLOC 2.2. AgrEauClim. Évolution de la demande en eau des filières agricoles de diversification

Ce bloc vise à étudier la diversification agricole pour des circuits courts ou pour la méthanisation et ses besoins en eau. À la suite des projets ClimaLeg (2021/2022) & ClimaLeg-EAU (2022/2023) qui ont mis en évidence l'importance de cette thématique de l'eau dans les problématiques de transitions des systèmes alimentaires franciliens (Touili et al., 2024), il s'agira de questionner les enjeux associés aux stratégies de diversification au sein des exploitations agricoles de la région Île-de-France et des besoins d'irrigation associés à celles-ci, en lien avec la problématique de la reterritorialisation de l'agriculture et de l'alimentation en Île-de-France.

Cadre pluriannuel :

La Région Île-de-France (IDF) se singularise par un ancrage relativement faible du dispositif PAT, alors que l'agriculture constitue un enjeu prégnant des politiques territoriales en termes d'aménagement de l'espace agri-urbain et de reterritorialisation des systèmes alimentaires locaux (Torre et al., 2013). Cela s'illustre tout particulièrement en Seine-et-Marne qui concentre la moitié de la surface agricole utile francilienne (338 000 hectares), où aucun PAT n'est répertorié.

Du côté de l'Essonne et des Yvelines, les PAT répertoriés sont en fait l'émanation des Territoires Agri-Urbains créés en 2007 pour préserver les espaces agricoles de l'emprise foncière urbaine avec aujourd'hui l'objectif de diversifier l'agriculture céréalière dominante dans la région (Toublanc et Moquay, 2021). Mais cette injonction à la diversification se heurte à la disponibilité de la ressource en eau. L'irrigation devient un impératif de toute politique de diversification maraichère dans les territoires agri-urbains en IDF (Touili et al., 2023). C'est aussi un besoin pour les démarches de méthanisation pour produire la biomasse nécessaire (Cadiou, 2023).

Cette action analyse par des analyses quantitatives les flux de biomasses et par des enquêtes qualitatives auprès des acteurs socio-économiques, la dépendance à l'irrigation de certaines stratégies de diversification agricole ou de relocalisation des filières de la production maraichère et de culture de valorisation énergétique, notamment dans les zones céréalières en région Île de France et dans la zone du bassin de la Seine. Elle étudie aussi la manière dont les politiques publiques accompagnent ces stratégies de diversification et les limites qu'elles rencontrent dans leur déploiement à l'échelle régionale et interrégionale. Il s'agit de remettre en perspective les différentes attentes de chaque usage/filière, ici agri-alimentaire, en matière d'eau avec les synergies et incertitudes sur l'accès aux autres ressources.

Les enquêtes porteront notamment sur :

- Les démarches d'installation et/ou de reprise d'exploitation agricole, et les problématiques d'emploi salarié associées, et leur impact sur l'accès à l'eau ;



- L'évolution de la demande des collectivités territoriales (restauration collective, PAT, etc.), ainsi que l'évolution possible des flux logistiques de proximité, notamment avec le projet de création d'un marché d'intérêt national « Rungis Nord » ;
- Les démarches de méthanisation en Île-de-France.

La scénarisation sera faite en année 2027.

Programme 2025 – 2026 :

- Expliciter des liens « Systèmes de cultures-Usages de l'eau(x) » ;
 - Étudier les besoins en eau,
 - Par cultures, par pratiques culturelles,
 - Par type de ressources en eau (nappe, superficielle ou non conventionnelle : eaux usées et traitées, eaux de ruissellement)
- Construire des indicateurs génériques « Systèmes de cultures-usages de l'eau(x) » ;
- Explorer les trajectoires futures de diversifications agricoles et leur impact sur l'eau ;
 - Par systèmes de cultures en fonction du climat,
 - En fonction des attentes de relocalisation alimentaires de la restauration collective (PAT des collectivités territoriales),
 - En fonction de l'évolution possible des flux logistiques interrégionaux ou de proximité, notamment en lien avec le projet AGORALIM du MIN de Rungis, au nord de Paris,
 - En lien avec le développement de la méthanisation en Île-de-France et l'implantation de cultures dédiées.

Co-financement :

- CBASC (Centre d'Études interdisciplinaires sur la Biodiversité, l'Agroécologie, la Société et le Climat (C-BASC) – Université Paris-Saclay : 3000 € ;
- Communauté de SQY 5000 € ;
- Communauté de Paris-Saclay 5000 € ;
- FEADER (programme LEADER, Terre et Cité) 51 000 € ;

BLOC 2.3. Pol-Plastic. La filière plastique : flux passés, consommations actuelles, projections

Ce bloc a deux objectifs premiers de compréhension des logiques et des pratiques d'acteurs (publics d'une part/privés d'autre part) face à la problématique des plastiques afin d'alimenter un troisième objectif de dialogue entre acteurs à l'échelle du Bassin de la Seine.

2.3.1 Les politiques publiques de prévention et l'expertise

Cadre pluriannuel

Le premier volet vise à définir et comprendre les actions mises en œuvre en termes de prévention de la consommation et du rejet des plastiques d'une part et de limitation de la diffusion plastique par les collectivités sur la Seine.

Deux questions scientifiques pourront être travaillées :

- Quelles sont les spécificités dans le traitement de la matière plastique dans les politiques publiques ? Comment les acteurs se représentent-ils ce problème public (via les macro-/microplastiques, comme un enjeu de santé publique, environnemental, etc.) ?
- De quelles manières l'expertise scientifique (telle qu'elle existe notamment au sein du PIREN-Seine) guide-t-elle les choix publics et laquelle est privilégiée (compréhension du métabolisme des produits/déchets plastiques, psychologie cognitive et environnementale, enjeux organisationnels) ? Quelles sont les attentes des acteurs des collectivités locales vis-à-vis de cette expertise ?

Programme 2025 – 2026 :

- Recherche de la documentation sur l'action des collectivités
- Rédaction d'un questionnaire et diffusion de ce dernier aux collectivités locales permettant d'avoir une première vision des politiques mises en œuvre, de leurs articulation, complémentarité ou contradiction à la fois sur la prévention et la remédiation de la pollution plastique ;
- Sélection de collectivités à investiguer via une enquête qualitative (entretiens semi-directifs)
- Traitement des résultats obtenus
- Analyse des résultats obtenus

Co-financement :

Stages financés dans le cadre d'OPUR 6

2.3.2 La filière logistique fluviale

Cadre pluriannuel

Il s'agit ici de comprendre par l'analyse une filière très présente sur la Seine. La filière de la logistique/navigation a été sélectionnée. Il s'agit de faire un inventaire des différents usages des plastiques voir fournir une idée des flux de plastiques utilisés dans cette filière. Cette approche permettra notamment d'évaluer la dépendance au plastique au sein de la filière et quelles sont/seraient les alternatives possibles. L'enjeu est de comprendre les initiatives que peuvent prendre les entreprises à l'échelle individuelle ou collective (au niveau de la filière, du territoire) et la manière dont ces acteurs réagissent aux normes, aux réglementations, aux politiques incitatives (notamment des collectivités locales).

Programme 2025 – 2026 :

- Prise de contact avec les acteurs des filières choisies et ciblées
- Préparation du protocole d'enquête
- Entretiens semi-directifs et observation socio-anthropologique (sur des chantiers ou des opérations de logistique de transport fluvial)

- Premières analyses des données.

2.3.3 Travail de prospective

La réalisation des deux volets précédents permettra l'organisation de microconférences en lien avec des ateliers de travail pour penser une Seine sans plastique. L'objectif est de réunir des acteurs publics, des entreprises, des citoyens ; les chercheurs pouvant alimenter de leurs connaissances le débat et donc de faire dialoguer expertise scientifique et profane. Cela prendrait la forme d'une « convention territoriale » qui permettrait d'inviter des chercheurs de plusieurs disciplines tout en créant une dynamique « territoriale ».

BLOC 2.4. Villes et transition énergétique comme sources de contaminants

Ce bloc vise à étudier deux facteurs de contamination qui sont peu connus : l'effet de la transition énergétique sur la mise en circulation de nouveaux matériaux ou de matériaux dans des quantités différentes et l'usure de la ville dans la production d'une pollution diffuse.

2.4.1 Analyse rétrospective et prospective de contaminations liées à l'industrie et la transition énergétique

Cadre pluriannuel

La transition énergétique vers des sources moins carbonées et l'économie circulaire vont modifier les pressions chimiques sur les milieux aquatiques et les sols. L'enjeu de cette action est de situer ces transitions sur le temps long à la fois rétrospectif et prospectif (de l'ordre de 20 ans pour la partie prospective). Il s'agit d'identifier et anticiper des évolutions futures des risques chimiques qui constitueraient des menaces pour les milieux et la santé, mais également des barrières potentielles à la réalisation de certains scénarios de transition écologique et énergétique par ailleurs souhaitables.

L'action élaborera des scénarios (en co-construction avec les actions qui élaboreraient des scénarios sur les mêmes domaines) sur d'une part la production/stockage d'énergie (notamment électrique) et d'autre part les filières de production et d'utilisation (recyclage éventuellement) impliquant des produits chimiques ciblés. Parmi les (familles de) produits chimiques ciblés, les PFAS (et leurs futures alternatives) sont les premiers considérés, étant donné l'universalité de leurs usages dans la production industrielle et l'énergie, leur persistance extrême et leurs risques pour la santé et l'environnement. Les HAP pourraient également être étudiés, du fait de leur importance en termes de pollution héritée, et que des sources importantes vont perdurer malgré la transition énergétique. Ces deux domaines énergie/PFAS se recouvrent partiellement puisque les PFAS ont un rôle important dans plusieurs technologies clés de la transition énergétique (ex. hydrogène, batteries).

Pour les domaines énergie/polluants étudiés, l'action consistera également à mobiliser les connaissances déjà élaborées dans le cadre du PIREN et générer de nouvelles données sur les tendances de contamination historique de façon à resituer les scénarios futurs par rapport aux contaminations passées.

Le but sera d'exprimer les scénarios en termes de risque chimique associé, en adaptant et utilisant l'indicateur de risque développé en phase 8. Il sera aussi de remonter des tendances de contamination héritées du passé aux usages passés, ce qui permettrait d'essayer d'exprimer ces tendances passées également avec cet indicateur, et d'avoir une certaine continuité et comparaison entre analyses rétrospectives et prospectives.

Programme 2025 – 2026 :

- Définir le territoire, les secteurs/technologies de l'énergie et les (familles de) produits chimiques faisant précisément l'objet des scénarios prospectifs.
 - Concernant les technologies, les critères de sélection seront notamment : leur pertinence sur le territoire, l'importance du point de vue de l'atteinte des objectifs de décarbonation, l'importance technologique de la chimie pour le secteur (criticité des fonctionnalités apportées par les produits chimiques pour les performances attendues), la connaissance a priori de produits chimiques dangereux utilisés dans le secteur, l'importance quantitative de la chimie en termes de nombre de produits chimiques utilisés et des quantités potentielles et émissions en jeu, et les risques a priori de rejets dans l'environnement ou d'exposition de l'homme sur l'ensemble du cycle de vie.
 - Le territoire sera aussi choisi en fonction de l'existence de données rétrospectives de contamination représentatives pour ce territoire.
 - Choix des familles de produits chimiques étudiées en analyse rétrospective et prospective (par ex., PFAS et HAP, métaux)
- Adaptation/définition des indicateurs rétrospectifs et prospectifs (idéalement identiques ou très similaires)
- Recensement et structuration de données pour le calcul des indicateurs dans le cadre des scénarios rétrospectifs, prospectifs, nécessaires au calcul de l'indicateur (début). Le travail sur l'approche rétrospective sera fait en lien avec l'action sur les archives sédimentaires «
- Élaboration des scénarios ».
 - Recensement et structuration de données pour le calcul des indicateurs dans le cadre des scénarios rétrospectifs, prospectifs, nécessaires au calcul de l'indicateur (suite).
 - Acquisition de données rétrospectives supplémentaires éventuelles.

2.4.2 Minéralogie urbaine

Cadre pluriannuel

Dans un contexte global d'extension des milieux urbains, cette action se focalise sur la minéralogie et la cristallographie (composition chimique à l'échelle atomique, éléments traces, texture à nano et micro-échelle, structure et chimie des surfaces minérales, propriétés redox et catalytiques) des particules émises par les matériaux dans la zone critique urbaine et à ses limites. En effet, les critères minéralogiques et cristallographiques sont encore peu utilisés au regard des critères de taille et de composition chimique globale pour qualifier les particules en milieu urbain alors qu'ils permettent souvent de les sourcer et de mieux comprendre leur réactivité aux interfaces avec les contaminants et les organismes biologiques. L'action vise à étudier le potentiel de minéraux marqueurs spécifiques de l'urbain (en particulier amphibole, chrysotile, phases cimentaires) pour tracer la dynamique spatiotemporelle des activités et usages urbains anciens ou récents (routes, bâtiments, ciments), mais également pour évaluer leur réactivité physicochimique aux interfaces, notamment vis-à-vis des composantes biologiques et chimiques des hydro-écosystèmes perturbés par l'artificialisation. Les particules minérales émises par altération et érosion des infrastructures urbaines et autres matériaux de construction utilisés en ville peuvent parfois constituer une contamination (particules fibreuses, métaux lourds, production de radicaux libres) et peuvent aussi être des vecteurs de contaminants organiques ou inorganiques piégés à leur surface. Ils jouent ainsi un rôle encore mal évalué dans le fonctionnement des cycles biogéochimiques (éléments majeurs et traces) et sur l'(éco)-exposome.



Enfin, ces particules minérales urbaines vont constituer de nouvelles signatures dans les archives sédimentaires de l'Anthropocène depuis les zones d'influence directes des milieux urbains jusqu'aux estuaires.

Le programme vise des phases d'échantillonnage pour caler la représentativité des sources et de leur devenir puis à utiliser les archives sédimentaires pour montrer l'évolution dans le temps et calculer des flux.

Programme 2025 – 2026 :

Durant la première année, des campagnes de prélèvements de poussières urbaines seront menées dans Paris, avec pour objectif de rattacher les composantes minéralogiques observées et leurs caractéristiques morphologiques et cristalochimiques à des termes sources représentatifs d'usages ou activités urbaines récentes ou anciennes (routes, bâtiments, végétation pour certains biominéraux). Ces échantillons seront analysés par diffraction des rayons X et par des mesures de magnétométrie (courbes d'hystérésis, susceptibilité magnétique en température), et à micro-échelle par microscopie électronique à balayage et à transmission. Les résultats permettront de faire ressortir des minéraux marqueurs d'usages ou d'activités urbaines en utilisant les critères qui les distinguent des minéraux géogéniques. Par ailleurs, une première évaluation du potentiel de contamination des particules sera effectuée à l'échelle des composantes minérales et ciblant des composés organiques et/ou inorganiques sélectionnés.

La deuxième année, les campagnes de prélèvements seront étendues à des particules de type aérosols et matières en suspension de rivières (Orge, Seine) pour connaître la composition minéralogique des poussières urbaines durant leur transfert entre différents réservoirs sédimentaires. L'approche de cristalochimie sera particulièrement utile pour distinguer les caractères non géogéniques des particules d'origine urbaine. En parallèle, un travail prospectif sera initié pour jeter les bases de protocoles pour mesurer le temps de résidence des poussières urbaines dans des réservoirs cibles en associant la mesure des radionucléides à celle des marqueurs minéralogiques (sur échantillons avec beaucoup de matière). Nous lancerons également à ce stade une réflexion sur de potentielles actions de science participative concernant la collecte d'échantillons de poussières urbaines qui pourront être réfléchies et testées dans le cadre de PartiCitaE, observatoire participatif de l'environnement urbain et plateforme de l'OSU Ecce terra. Cela permettrait par exemple de s'appuyer l'expérience du dispositif déjà existant EcorcAir de collecte participative d'écorces de platane à des fins de cartographie de l'exposition aux particules fines métalliques.

3. Axe 3. Histoire, paysages, territoires et restauration écologique

Ce thème vise à interroger les relations des sociétés à l'écosystème du fleuve Seine et aux petits cours d'eau affluents et leur évolution sur le temps long. Les terrains choisis sont à la fois des rivières transformées et des espaces cumulant les enjeux contemporains en lien avec la transition écologique (artificialisation des sols, îlot de chaleur urbain, etc.). L'axe 3 s'appuie sur des territoires particuliers représentatifs de mode de fonctionnement et d'enjeux différents, déjà étudiés sous plusieurs angles en phase 8 du PIREN-Seine : (1) la Bassée, plaine alluviale de la Seine à l'amont de Paris, et (2) des petits cours d'eau non domaniaux (urbains et ruraux). Les travaux menés dans l'Axe 3 doivent contribuer à proposer une typologie des cours d'eau et de leurs paysages (du chenal à la plaine alluviale) environnants en fonction de cet objectif de restauration. Le thème pourra couvrir aussi des comparaisons avec d'autres territoires en France et à l'étranger pour aider à identifier les spécificités du bassin de la Seine et ouvrir le champ des possibles. L'objectif est de promouvoir une démarche holistique d'évaluation des socio-hydrosystèmes adaptée aux environnements en crise pour proposer des trajectoires d'amélioration ambitieuses. L'axe 3 a ainsi pour objectif d'établir un diagnostic global pour mieux appréhender les enjeux de restauration des cours d'eau et des milieux humides dans une perspective relationnelle. Inscrit dans une compréhension de la dynamique d'aménagement et de planification (y compris touristique), ce diagnostic vise à accompagner les gestionnaires et porteurs de projets pour faire dialoguer les objectifs réglementaires, les contraintes techniques et la demande sociale. Pour cela, l'axe 3 propose de couvrir le temps très long (holocène, ou 50-200 ans), abordé à la fois par l'étude d'archives sédimentaires et une approche géohistorique, les dynamiques socio-environnementales contemporaines et les modalités de restauration permettant d'offrir de nouvelles perspectives. Les approches historiques seront mises en dialogue avec les diagnostics contemporains pour éclairer les enjeux de gestion. Une réflexion sera menée sur les modalités de transfert de connaissance favorisant une appropriation des objectifs multiples de restauration par les élus, gestionnaires, techniciens et riverains.

Concrètement, l'Axe 3 s'appuie sur :

- Des travaux géoarchéologiques et géohistoriques (archives sédimentaires, archives cartographiques et administratives) ;
- Des diagnostics de terrain : fonctionnement hydro-géomorphologique (en particulier la dynamique sédimentaire), biodiversité de la rivière et son environnement (berges, plaine alluviale, ripisylve, etc.), connectivité sociale (dont des indicateurs ont pu commencer à être élaborés en phase 8) ;
- Des enquêtes socio-anthropologiques auprès des acteurs locaux (entretiens, ateliers, etc.), des riverains aux gestionnaires ;
- Une participation active des acteurs (collectivités, entreprises, habitants) à la création de savoirs actionnables et mobilisables pour relever les défis locaux et régionaux du changement climatique (adaptation territoriale/de filières) ;
- Des séminaires méthodologiques et thématiques communs entre les deux blocs.

BLOC 3.1. La Bassée

3.1.1 Évolution fluviale en Bassée à long-terme et très long-terme, forçages climatiques et anthropiques

Cadre pluriannuel :

L'objectif de cette action est d'affiner significativement le calendrier de l'évolution du réseau fluviale dans la plaine alluviale de la Bassée en lien avec l'évolution climatique et les aménagements par l'Homme. Il s'agit de documenter à très long-terme le fonctionnement d'un territoire tourné ou non vers la rivière, comme nous avons pu commencer à l'esquisser dans l'action chenaux abandonnés de la phase 8 du PIREN.

Trois axes seront menés en parallèle. Le premier est géomorphologique et géo-archéologique et permettra de mieux caractériser les formes et tailles de modelés fluviaux passés (ex. : paléo-chenaux) et de les inscrire dans un contexte à l'échelle de l'Holocène. Il s'agit de documenter si on retrouve en Bassée une évolution fluviale cohérente avec celles d'autres rivières de France et d'Europe (Loire, Somme, Tisza). On s'intéressera dans ce cadre à l'impact de la migration des rivières sur la préservation des enceintes préhistoriques. Le second est historique. Il s'appuiera sur des documentations non exploitées jusqu'à présent comme les archives ecclésiastiques. Une attention particulière sera portée à la grande Noue d'Hermé et à l'histoire des moulins de la vieille Seine. Le troisième volet de ce projet utilisera des proxys paléo-environnementaux (diagrammes polliniques, molécules organiques d'origine bactérienne, isotopie des carbonates) pour reconstituer l'évolution de la température, du pH et du couvert végétal au cours de l'Holocène. Des tests seront réalisés sur les variations saisonnières de température durant certains événements climatiques, notamment au début de l'Holocène. On pourra s'appuyer sur les travaux menés dans le cadre du PCR Confluence Seine-Aube, où des archives pertinentes ont été mises à jour. Enfin, l'action donnera la part belle à la Réserve naturelle de la Bassée en étudiant son évolution géomorphologique à long terme. La grande Noue d'Hermé, située en amont, apparaît comme une cible de choix dans cette optique, tout comme le site de Noyen-sur-Seine, déjà étudié lors de la phase 8.

Programme 2025 - 2026 :

Les deux premières années seront dédiées aux travaux de terrain. Les premières analyses géochimiques débuteront fin 2025 et se poursuivront par la suite en 2026 et lors de la fin de la phase. Le travail d'analyse des archives, de plus longue haleine, commencera lors de ces deux premières années, mais les résultats ne sont pas attendus avant les deux dernières années de fonctionnement (2027-2028).

Co-financement :

Une demande de financement est en cours auprès du DIM-PAMIR pour un postdoc de 18 mois sur l'évolution des températures et des débits en Île-de-France à l'Holocène (projet PaléHoloS).

Le projet pourra s'appuyer sur les travaux menés dans le cadre du PCR Confluence Seine-Aube mené en amont de la Bassée pour certaines analyses paléo-environnementales et datations.

3.1.2 Penser ensemble les transitions passées et futures de la plaine alluviale de la Bassée – Collectif acteurs-chercheurs

Cadre pluriannuel :

L'objectif principal de l'action est de pérenniser et faire vivre le collectif acteurs/chercheurs de la plaine de La Bassée, dispositif de sciences participatives, visant à créer un lieu d'échanges de connaissances entre savoirs profanes, expérimentiels et scientifiques, de discussions afin de définir ou d'approfondir certaines questions de recherches propres ou en lien avec les territoires de la plaine alluviale.

À la suite des différentes discussions qui ont eu lieu lors de la phase 8, des groupes thématiques ont été définis (modèles/données d'une part et histoire d'autre part). Ces derniers ont permis de mettre en exergue des axes de recherche ou d'action au croisement des intérêts des chercheurs et des acteurs (notamment collectivités publiques) (cf. travail sur la modélisation hydrologique de La Bassée, sur l'histoire longue de la plaine alluviale [étude sur l'occupation humaine et les évolutions géomorphologiques] réflexion autour des multiples représentations et instrumentalisation de l'inondation au fur et à mesure du temps...). À chaque fois, l'enjeu est que cette recherche puisse en partie répondre à des réflexions d'acteurs opérationnels ou puisse leur donner des éléments de prise et d'appropriation via notamment une valorisation co-construite (fascicule histoire). L'ambition est de poursuivre cette dynamique qui va évoluer puisque les demandes qui pouvaient résulter de la constitution de la CLE et de son travail vont se modifier dans le cadre de l'adoption prochaine du SAGE, que le panel de chercheurs va également varier et que nous allons pouvoir capitaliser sur les interactions passées et les résultats obtenus.

Le travail partenarial se fera autour des thématiques suivantes :

- Continuer à explorer l'évolution du rapport aux aléas (l'inondation, mais aussi la sécheresse). Il s'agira notamment d'explorer d'une part la mémoire vivante des citoyen.nes sur la Seine et ses crues (avant/après la mise en place des barrages, la remobilisation des arguments avec les nouveaux ouvrages de gestion de l'inondation et de facilitation de la navigation grand gabarit)² et d'autre part la manière de penser les nouvelles vulnérabilités face au changement climatique et les solutions d'actions (en lien avec l'action SFN) ;
- Approfondir, mettre en discussion, valoriser des travaux de modélisation de La Bassée au regard du changement climatique et de la sensibilité des acteurs de terrain face à certains enjeux (niveau de prélèvement, partage de la ressource eau, intermittence des cours d'eau en tête de bassin ; impact sur les écosystèmes) ;
- Penser les meilleurs objets d'intermédiation entre les produits/les résultats de la recherche et les besoins, attentes, connaissances des parties prenantes du territoire passe par trois réflexions à mener :
 - Travailler sur le recensement des données hydrologiques et historiques, des personnes les détenant et leur mutualisation en élaborant un annuaire des personnes-ressources ;
 - Comment sont reçus, discutés, les messages des chercheurs basés sur les modèles ou des protocoles de recherche ? Quelles autres modélisations possibles (par les collectivités, les professionnels) ? Quels outils intermédiaires concevoir pour favoriser le dialogue et la compréhension ?

² En 2024 devrait être récoltée une partie du matériel propre à cette perspective, mais celui-ci devra ensuite être traité.

- Définir les points d'incertitudes (ce qu'on sait, ce qu'on ne sait pas en ce qui concerne les têtes de bassin, dynamique de l'inondation) pour aider à la décision publique sur la plaine alluviale.
- Traduire un certain nombre de réflexions des acteurs qui considèrent La Bassée comme un espace « servant » qui doit pouvoir se projeter dans les décennies à venir comme un lieu productif, touristique, de ressourcement par rapport à la métropole (attractivité résidentielle) en question de recherche et d'actions.

L'enjeu est que la majorité des recherches présentées, travaillées et discutées soit travaillée par ailleurs dans des actions du PIREN-Seine ou d'autres projets pour rentabiliser au mieux le temps investi.

Aussi cette action comporte-t-elle un volet animation (AG annuelle du collectif, réunion des groupes de travail), ainsi que la structuration de collectifs pour faire avancer les thématiques et permettre le dialogue.

Programme 2025 - 2026 :

Lors des deux premières années, le travail du groupe d'acteurs/chercheurs se focalisera sur :

- Détermination plus précise des attendus de chacun au regard des perspectives de recherches des scientifiques (réunion liminaire du collectif pour cette nouvelle phase) ;
- Enquête auprès de la population (personnes ayant accepté que leur témoignage soit recueilli)
- Détermination des supports de valorisation du matériel recueilli sur la Seine extraordinaire et mise en lien avec les travaux de recherche menés sur une période à définir ;

Co-financement :

Pas de co-financement prévu

BLOC 3.2. Les petites rivières franciliennes

3.2.1 Typologie et Trajectoires des PETites Rivières Franciliennes (T²-PERIF)

Cadre pluriannuel :

L'objectif de cette action est de dresser un inventaire de la diversité des trajectoires fonctionnelles biophysiques de cours d'eau dans le contexte francilien afin d'être en mesure d'en proposer une typologie régionale intégrant à la fois les dynamiques actuelles et le rôle des héritages. L'action propose l'extension et l'approfondissement des recherches entreprises dans la phase 8 (trajectoires fonctionnelles de petites rivières urbaines depuis 2000 ans, Axe 3, Bloc1). Il s'agit ainsi d'étendre les investigations aux petits cours d'eau ruraux afin de proposer une typologie générale des petites rivières franciliennes (ordre 1 à 4). À cette fin, (1) l'étude de la diversité des situations hydrosédimentaire et hydroécologique locales, dont nous avons montré qu'elle pouvait être cruciale, sera complétée et (2) l'étude sur la longue durée afin de mesurer la part des héritages sédimentaires et écologiques dans le fonctionnement contemporain de ces hydrosystèmes sera approfondie afin de positionner la situation contemporaine dans une trajectoire globale afin d'anticiper d'éventuels points de bascule liés à la trajectoire de ces hydrosystèmes et à l'impact de l'urbanisation et des politiques de restauration et du changement climatique en cours.

D'un point de vue méthodologique, l'action propose de combiner approche régionale et études locales. Les données à l'échelle régionale seront exploitées afin de produire une cartographie des petits cours d'eau franciliens. Les efforts méthodologiques basés sur l'utilisation des données LIDAR, développés lors de la phase 8 (morphologies et ripisylve) seront complétés, notamment en ce qui concerne la caractérisation des formes du chenal, sur le Morbras (données acquises) puis étendus à l'ensemble de petites rivières franciliennes à partir de la couverture LIDAR HD de l'IGN qui devrait être disponible prochainement pour la région Île-de-France. Parallèlement, de nouvelles campagnes de carottages et d'analyses sédimentologiques et paléoécologiques seront menées afin de caractériser les trajectoires hydro-écologiques et l'empreinte anthropique au cours des 2 derniers millénaires (aménagements hydrauliques, héritages morphosédimentaires, végétation rivulaire...) sur des cours d'eau ruraux pour lesquels les informations sur le fonctionnement actuel sont largement disponibles (en particulier Orge et ses affluents, Grand-Morin et Orgeval). Ces campagnes viendront compléter les données obtenues ou en cours d'acquisition sur les cours d'eau urbains déjà étudiés dans la phase 8 du PIREN-Seine (Mérantaise, Morbras, Beuvronne, Croult et Petit-Rosne). Une attention particulière sera accordée aux bassins versants dont la surface urbanisée représente de l'ordre de 10 %, car les résultats de la phase 8 ont démontré l'altération systématique de la qualité biologique de ces cours d'eau au-delà de ce seuil et une hétérogénéité en deçà, ce qui reste à expliquer. Temporellement, un effort sera fait pour mieux comprendre les dynamiques hydromorphologiques des deux derniers siècles à la fois d'un point de vue des chenaux et de leur charge solide, mais également du point de vue de la dynamique d'aggradation des plaines alluviales et des transformations hydrologiques et environnementales associées. Cet effort reposera sur l'utilisation des radionucléides (^{210}Pb , ^{137}Cs) comme moyen de datation des dynamiques du dernier siècle et de traçages des sédiments fins (MES).

La construction de la typologie régionale permettra de réfléchir à la mise en place de projets de restauration définis dans le cadre des Solutions fondées sur la Nature. Elle accordera une attention particulière à l'analyse des tronçons ayant déjà fait l'objet de restauration, car les résultats de la phase 8 suggèrent la production de tronçons à la morphologie spécifique. Il s'agit donc d'examiner les caractéristiques hydrogéomorphologiques et l'occurrence de ce type de tronçon à l'échelle régionale pour nourrir les discussions avec les gestionnaires de cours d'eau (Action « Collectif-PERIF ») sur les métriques utilisées et les alternatives possibles, en particulier les *Low Tech Process Based solutions* (LTPBS).

Programme 2025 - 2026 :

- Caractérisation des fonctionnements hydrologiques, hydrosédimentaires et écologiques contemporains par des approches de terrain et de laboratoire selon des méthodes déjà éprouvées pour l'analyse de tronçons représentatifs : CARHYCE, I2M2 ;
- Utilisation de données sur l'occupation du sol et LIDAR à haute densité afin de déterminer précisément l'organisation longitudinale et transversale des cours d'eau. L'objectif est de définir les caractéristiques des petites rivières franciliennes d'un point de vue de la morphologie du chenal, de la ripisylve et de leur plaine alluviale ;
- Mobilisation des données existantes sur les sites restaurés afin d'identifier les acteurs territoriaux et les experts concernés et faire une mise à jour des données déjà acquises par HYCAR à l'échelle régionale ;
- Choix de tronçons identifiés comme riches en archives sédimentaires et représentatifs par les analyses LIDAR et MOS conduites sur les cours d'eau cibles. Réalisation de prospections géophysiques, de carottages et d'analyse des archives sédimentaires sur les affluents de l'Orge (Rémarde, Gloriette, Renarde) et du Grand-Morin (Orgeval) dans les zones riches en archives sédimentaires. Deux transects nouveaux complets par an sont prévus en plus de la poursuite des investigations sur les rivières urbaines (Morbras et Croult). Il s'agit de caractériser l'évolution du style fluvial, et de la géométrie du lit et des environnements des plaines alluviales à partir d'au



moins trois transects par cours d'eau étudié sur la durée de la phase 9. Un carottage préférentiel sera retenu par transect pour les analyses multi-indicateurs ;

- Datation des carottes (^{210}Pb , ^{137}Cs) au LSCE ;
- Début des analyses multi-indicateurs des sédiments échantillonnés : analyses sédimentaires et analyses paléobiologiques au LGP (granulométrie, DRX, CHN, susceptibilité magnétique, palynologie, dendrologie, microrestes non polliniques, signal incendie, diatomées) ou au LSCE (radionucléides, analyses XRF) ;
- Début des analyses en prestation (Datations radiocarbone et OSL...) ;
- Un effort spécifique sera entamé au cours des deux premières années pour tester l'ADNe Ancien qui permettrait de définir l'évolution de la végétation, des habitats et de la faune.

Co-financement :

Recherche d'un financement pour une thèse sur la typologie régionale intégrant les trajectoires biophysiques des petites rivières franciliennes

3.2.2 Relations des populations aux Petites rivières franciliennes (RP-PERIF)

Cadre pluriannuel :

L'action s'inscrit dans la poursuite des travaux menés dans la Phase 8 sur le volet social de caractérisation des petites rivières urbaines en vue de leur restauration. Cette action s'inscrit dans une approche multi-niveaux pour appréhender la conduite des projets de réhabilitation des petites rivières dans leurs dimensions sociales et politiques.

Il s'agit d'une part d'interroger la dynamique spatiale et temporelle de diffusion de la restauration écologique des rivières à l'échelle de l'Île-de-France. Pour cela, un inventaire des opérations et projets sera constitué puis mis en perspective avec les caractéristiques sociodémographiques, environnementales et foncières des tronçons concernés afin d'identifier les facteurs favorables ou non à l'aboutissement des projets, mais aussi d'évaluer les effets de ces opérations sur la répartition des aménités environnementales dans une perspective de justice environnementale. Il s'agit de rendre compte des difficultés techniques et politiques de montage spécifiques aux projets de restauration de cours d'eau urbains. Il s'agit par ailleurs de caractériser les paysages et les espaces publics produits par ces travaux afin de conduire une réflexion sur les formes paysagères produites par la restauration et une normalisation des usages associés.

Il s'agit d'autre part d'étendre la caractérisation des relations humains-rivières entamée dans la phase 8, à travers de l'évaluation de la connectivité hydrosociale et des approches sensibles, sur de nouveaux terrains afin de couvrir une plus grande représentativité des cours d'eau du bassin de la Seine. De nouveaux cours d'eau urbains seront enquêtés (Mérantaise, Beuvronne) pour compléter les informations nécessaires à la construction d'une typologie de ces socio-hydrosystèmes croisant diagnostic biophysique et social tandis que nous intégrerons des petites rivières rurales (en particulier Orge et ses affluents, Grand-Morin et Orgeval ; Mauldre).

Enfin, à l'échelle locale de tronçons correspondant à des quartiers et à l'espace vécu des habitants, l'action vise à saisir la relation pratique, sensible et cognitive des individus et groupes à la rivière (Morbras, Croult et Petit Rosne ou Bièvre par exemple). Des enquêtes individuelles et collectives seront menées pour cerner les attentes des habitants concernant la gestion de la rivière : celles-ci viseront à appréhender leurs relations aux paysages et aux espaces publics rivulaires. Elles seront conduites à

partir de sites déjà restaurés ainsi qu'à partir de sites devant l'être afin d'interroger la réception de différentes solutions fondées sur la nature, le rapport à la végétation spontanée et entretenue, et de questionner la comptabilité des demandes locales avec des solutions moins coûteuses (*low tech process based restoration*). Parallèlement, les dimensions sensibles, notamment le son, seront particulièrement mobilisées. Il s'agira en particulier d'analyser les changements induits par la restauration sur la fréquentation et les rapports à la rivière, mais aussi en termes de mobilisation citoyenne vis-à-vis de l'environnement ordinaire. Enfin, une attention sera portée au rapport au risque d'inondation à travers notamment le suivi de projets de déconstruction (Yerres, Morbras).

Programme 2025 - 2026 :

Une base de données géoréférencée des opérations de restauration réalisées en Île-de-France sera construite à partir d'informations collectées auprès de l'Agence de l'Eau Seine Normandie et d'enquêtes menées auprès des maîtres d'ouvrage (syndicats de rivière/bassin en particulier). Cet inventaire sera mis en regard d'autres informations géolocalisées afin de caractériser d'un point de vue socio-économique chaque opération.

Le diagnostic de connectivité hydrosociale sera étendu à des petites rivières rurales afin d'étendre la typologie à d'autres types de cours d'eau et de compléter la base de données.

Des enquêtes individuelles et collectives seront menées auprès des habitants et des riverains pour cerner les relations à la rivière et les attentes vis-à-vis de son futur.

Co-financement :

Contrat doctoral de l'ED395 de l'Université Paris Nanterre (36 mois : 1/11/2023 – 31/10/2026) : thèse d'Aïda Rabia, La réhabilitation des petites rivières urbaines au regard de la justice environnementale, étude des projets conduits en Île-de-France et au Royaume-Uni, UMR LAVUE 7218 CNRS (Dir. M.-A. Germaine).

Dépôt de l'ANR ALEAU (Resp. P. Guinard, LAVUE) retenue en phase par le comité CE55 – Sociétés et territoires en transition (réponse – juillet 2024).

3.2.3 Transport de la charge de fond : accès à la ressource, obstacle à la continuité et restauration

Cadre pluriannuel :

Dans cette action, nous poursuivrons les travaux entrepris lors des deux phases précédentes du PIREN-Seine. Ils ont permis de mieux caractériser le transport sédimentaire grossier de plusieurs affluents de la Seine, notamment autour de petits barrages dont certains ont fait l'objet d'opérations de restauration. Lors de la phase 9, nous proposons de travailler sur deux questions aujourd'hui considérées comme clés dans la gestion hydromorphologique des cours d'eau :

La première concerne toujours la continuité sédimentaire. En effet, si nous commençons à bien comprendre comment la charge de fond franchit les nombreux obstacles en travers qui jalonnent nos cours d'eau, leur impact cumulé, notamment sur la structure et la composition du fond des lits, est toujours mal connu. Aussi, tout en poursuivant le suivi du transport de la charge de fond des différents sites équipés lors des phases précédentes, nous changerons d'échelles spatiale et temporelle. Grâce à nos observations de terrain et à l'exploitation de chroniques de débits reconstitués, les caractéristiques granulométriques et les volumes transportés à l'échelle de plusieurs sous-bassins (haute Seine, Saulx, Ource, Armançon, Risle, Avre, haute Yonne, Rognon) pourront être modélisés sur



des périodes de plusieurs décennies et l'effet cumulé des seuils et de leur retenue pourra alors être évalué. Pour les opérations de restauration (arasement total ou partiel des ouvrages), la compréhension des réajustements du lit en amont et en aval des anciens obstacles et le rétablissement du transport de sédiments doit être approfondie pour pouvoir anticiper les évolutions post-restauration. Cela n'est possible que grâce à des suivis de long terme. Nous proposons dès lors de poursuivre notre étude du réajustement de l'Yonne à Château-Chinon dont le barrage a été supprimé en 2015 et de l'Armançon à Bas Rebourseau sur laquelle la continuité a été restaurée en 2020.

La seconde question que nous souhaitons traiter concerne la continuité latérale ou, autrement dit, l'accès à la ressource sédimentaire présente dans les plaines alluviales. Nos travaux précédents montrent en effet que le déficit en charge mobile très souvent observé dans les cours d'eau du bassin ne peut être expliqué par la seule présence des obstacles en travers. Il trouve également son origine dans la déconnexion des chenaux avec leur plaine alluviale en raison de la présence ancienne de protections de berge. La restauration de dynamiques hydrosédimentaires suffisamment actives pour permettre un bon fonctionnement biophysique des cours d'eau ne sera possible qu'en redonnant à la rivière un accès à la ressource en rétablissant une certaine mobilité latérale des lits. Pour ce faire nous proposons d'évaluer les capacités de recharge alluviale de plusieurs cours d'eau du bassin (Seine, Yonne, Marne) en déterminant les mobilités latérales effectives et potentielles des lits, en caractérisant la nature des alluvions présents dans les plaines (à partir de la BSS et d'acquisitions LiDAR et photogrammétriques des berges actives) et en évaluant un taux d'aménagement de berges. La nature et l'historique de ces aménagements seront également étudiés pour plusieurs sous-bassins. Enfin, la pertinence des nouvelles solutions fondées sur la nature de type LT-PBR (*low-tech process based restoration*) sera également évaluée, notamment pour la restauration de la dynamique morpho-sédimentaire des petites rivières urbaines.

Programme 2025 - 2026 :

- Relevé des particules injectées (RFID) autour des opérations de restauration de la continuité sédimentaire sur l'Armançon et Yonne et de deux petits barrages sur le Rognon et la Risle. Dans le cas de l'Armançon et l'Yonne, des levés topographiques (DGPS + drone) des anciennes retenues et des tronçons à l'aval seront également effectués.
- Mesure de la dynamique latérale des lits à partir d'une étude diachronique de cartes et photographies aériennes sur plusieurs tronçons de la Seine, de la Marne, de l'Yonne et de leurs affluents. Elle sera par ailleurs directement mesurée à l'aide d'un petit LiDAR portable (LiDAR Iphone) sur plusieurs tronçons du Morbras et de la Mérantaise (sites à sélectionner et équiper).
- Démarrage de l'étude géohistorique des aménagements en berge sur ces mêmes cours afin d'évaluer un taux de déconnexion des lits et de la cartographie des stocks alluviaux grossiers (notamment à partir de la BSS).
- Démarrage de l'évaluation de la pertinence de la mise en place de restauration low-tech sur la Mérantaise et le Morbras (étude bibliographique, cartographie des sites potentiels). Cette action sera menée en relation étroite avec les gestionnaires.

Co-financement :

Une demande de financement de deux postdocs et d'un ingénieur de terrain pour le premier volet de cette action a été faite auprès de l'AESN.



4. Les contaminants — niveaux et effets dans les écosystèmes et sur la santé

Le bassin de la Seine concentre une mosaïque d'usages du sol de densité urbaine variable et d'activités hétérogènes (pôles industriels, agriculture intensive...). Ceux-ci constituent autant de sources d'émissions de contaminants dans l'environnement (eau, sol, air). Cette contamination multiple affecte la qualité des milieux et la biodiversité qu'ils abritent, y compris la santé humaine. Cet axe s'intéresse aux risques induits par ces pressions sur les santé environnementale et humaine, qui sont interdépendantes selon le concept *One Health — Ecohealth*. Il s'agit de comprendre les liens entre pressions et réponses du vivant sur de larges échelles temporelles et spatiales en conditions réelles. Pour y répondre, le PIREN-Seine dispose d'atouts forts en raison de son socle de connaissances, son expertise scientifique, et la diversité des usages documentés sur le bassin.

Depuis le début du PIREN-Seine, les actions menées ont permis d'améliorer les connaissances sur le transfert et le devenir d'un large panel de contaminants dans l'hydrosphère. Elles ont également permis l'essor d'approches destinées à caractériser la multicontamination et le développement de biomarqueurs de toxicité. La dernière phase a soulevé de nouveaux enjeux concernant *i)* la recherche de contaminants émergents (composés pharmaceutiques, Sn, nanoparticules...) *ii)* l'analyse globale de la contamination *iii)* la variabilité des effets à différentes échelles biologiques et plus particulièrement, *iv)* la difficile mise en relation entre pressions chimiques et marqueurs d'effet.

Au cours de cette phase, l'accent sera mis sur l'établissement de liens entre expositions multiples, réponses multi-échelles et risques environnementaux/sanitaires. Il s'agira notamment de prendre en compte des montées en échelles temporelle, spatiale et biologique pour améliorer la caractérisation des contaminations multiples et leur toxicité globale sur l'environnement et l'humain, identifier des interactions entre dynamiques chimiques et cycle du vivant, et cibler des fonctions globales comme outils génériques et robustes de diagnostic de l'état des écosystèmes.

Pour une compréhension fine des relations pressions-réponses, les actions basées sur des expérimentations de terrain couplant des descripteurs interdisciplinaires à large échelle temporelle ont été privilégiées. Elles reposent sur des sites ateliers étudiés depuis plusieurs années et connus du PIREN-Seine pour présenter des signatures de multicontaminations différentes, inhérentes à leur typologie : le bassin de l'Orge en contexte urbain ou le bassin d'Orgeval en contexte agricole, par exemple. En raison de son gradient de contamination d'origines anthropiques combinées, l'axe fluvial de la Seine (Marnay/Bougival/Triel/Poses) constitue également un objet d'étude intéressant pour le suivi des dynamiques, en particulier soumis à des conditions extrêmes et variations de charge sédimentaire. Par ailleurs, l'utilisation de données antérieures pourra alimenter la compréhension et l'anticipation d'effets sur le temps long et les risques associés pour la santé.



BLOC 4.1. Ecodynamique de la multi-contamination et rôle du biote

Ce premier bloc d'actions vise à améliorer les connaissances sur la dynamique des multicontaminations, à savoir l'évolution temporelle des transferts et devenir des mélanges de contaminants au sein de compartiments interconnectés (air, sol, eau, sédiment, y compris le biote). Un intérêt particulier sera donné à la place du biote dans le cycle des contaminants, en tant que bioréacteur.

Les actions proposées visent à étudier plusieurs contaminants (pesticides, antibiotiques, microplastiques, antimoine, métaux, PFAS, HAP...), leurs flux ou leurs dynamiques tant spatiales (atmosphère–sol–eau, MES–Sédiment, relations nappes-rivières) que temporelles (événements pluvieux — saison — pluriannuelle). Elles s'intéressent aussi aux processus de dégradation naturelle ou biotique, et comment le biote peut modifier ces contaminants au sein des bassins versants. Ces actions s'effectueront en milieu agricole (bassin d'Orgeval), en milieu urbain (bassin d'Orge) ou sur l'axe Seine et ses affluents majeurs.

Ce bloc interagira avec les blocs 2 et 3 de l'axe 4, mais aussi avec l'axe 2 et l'axe 5. Il comprend 6 actions pour un budget prévisionnel de 268,8 k€ pour l'ensemble de la phase 9.

4.1.1 Suivi long terme de la contamination par les pesticides (et les antibiotiques) dans le ru des Avenelles

Cadre pluriannuel :

Le suivi en continu de la contamination du ru des Avenelles s'effectue depuis 2008, date à laquelle la station a été équipée grâce au financement conjoint du PIREN-Seine et du projet Phyt'Oracle (EC2Co, CNRS). La dynamique des concentrations moyennes mensuelles sur le long terme fait apparaître des processus de restitution des pesticides expliqués par les échanges nappe-rivière et du système de drainage, notamment par la comparaison entre les matières actives actuelles et passées et leurs métabolites. Ces données ont permis de réaliser les premières calibrations du modèle PeSTICS sur l'Orgeval. Plus récemment, l'insertion d'implants « contrôle » ou chargés en pesticides dans des chabots engagés a permis de montrer l'effet écotoxicologique mesurable après 2 semaines d'imprégnation, mais réversible du S-métolachlor sur les individus.

Ces travaux ont permis de mettre en évidence : *i)* la dynamique saisonnière de la contamination du cours d'eau pour les pesticides actuels et passés, La réhomologation récente de la terbuthylazine *ii)* les effets mesurables, mais temporaires de la contamination sur certains organismes aquatiques sans pour autant observer d'accumulation dans les tissus, et *iii)* l'intérêt d'utiliser les résidus de pesticides comme marqueurs de l'origine des masses d'eau.

Dans cette nouvelle phase du PIREN-Seine, il s'agit de continuer ce suivi tant en continu sur le cours d'eau que des prélèvements ponctuels dans les piézomètres. Ce suivi permet d'assurer une continuité dans l'étude du bilan d'exportation à l'échelle du bassin versant et permettre d'affiner les processus à considérer dans la modélisation.

Les bilans annuels de flux de pesticides calculés aux Avenelles sont un atout considérable pour évaluer l'efficacité de mesures de réduction d'usage de pesticides prises sur le bassin. Des discussions sont en cours avec le SEDIF afin de trouver une zone test pour inciter les agriculteurs à limiter leurs traitements phytosanitaires par le biais de mesures PSE (paiement pour services environnementaux). Le bassin de l'Orgeval serait alors un territoire privilégié pour mener à bien ces mesures et le suivi des flux de pesticides permettra de confirmer l'efficacité de telles mesures. Ces résultats pourront être repris dans l'axe 5 pour identifier les leviers d'action à tester dans la scénarisation du bassin versant de la Seine.

À ce suivi des pesticides sera ajoutée ponctuellement l'étude de la contamination par les antibiotiques dans le ru des Avenelles (période d'étiage) qui pourra également s'étendre à l'aval de Coulommiers. En effet, des analyses ponctuelles réalisées en 2022 avaient montré la présence du sulfaméthoxazole dans le ru des Avenelles. La présence de cet antibiotique pourrait s'expliquer par des rejets d'eaux usées en amont de la station de mesure. Ces mesures permettront d'évaluer l'impact de ces rejets au sein d'un bassin particulièrement agricole et feront le lien avec l'étude des effets écotoxicologiques menés dans l'action 4.2.3.

Enfin, le suivi de la contamination atmosphérique (action 4.3.1) pourra être mené à partir de 2026 sur le site de Boissy-le-Châtel pour établir un bilan d'exposition humaine aux pesticides sur ce site agricole. L'idée est de comparer les contributions respectives de l'eau potable (à échantillonner par exemple directement au robinet à Boissy-le-Châtel), l'air et l'alimentation (par le biais d'utilisation de bases de données des aliments). Ce risque d'exposition pourra être mesuré et comparé également à Paris.

Programme 2025 – 2026 :

Le suivi en continu de la contamination par les pesticides aux Avenelles sera poursuivi, s'ajoutera le prélèvement de 5 piézomètres du bassin (2 campagnes/an). En concertation avec l'action 4.2.3, des analyses sur la contamination en antibiotiques sur 3 sites sur le bassin de l'Orgeval seront également réalisées. Le travail en lien avec les PSE ne sera mené que lorsque les discussions avec le SEDIF auront abouti.

4.1.2 Microplastiques dans le bassin de l'Orgeval : sources, dynamiques et transferts

Cadre pluriannuel :

Ce projet vise à étudier les microplastiques dans diverses matrices (eau, sédiment, sol et air) à l'échelle d'un petit bassin versant agricole afin de traiter de façon parallèle un volet lié aux flux et transferts des microplastiques ainsi qu'un volet sur les sources agricoles de cette pollution.

Le site sélectionné, le sous-bassin des Avenelles (46 km²) dans le BV Orgeval (107 km²), fait l'objet d'un suivi détaillé et approfondi depuis 60 ans, dans le cadre notamment des phases précédentes du PIREN. Les connaissances acquises sur le fonctionnement des eaux du bassin et son instrumentation permanente et spatialement dispersée permettront de contribuer à l'évaluation des sources de microplastiques et leur transfert entre et au sein des compartiments.

Pour le compartiment atmosphérique, les retombées des microplastiques vont être collectées sur différentes échelles de temps : de l'échelle de l'événement pluvieux à des périodes intégrées plus longues (plusieurs jours à plusieurs semaines). Ceci permettra de déterminer l'échelle temporelle des flux.

L'impact de l'agriculture sur les sols sera documenté en s'intéressant à des sols de cultures diverses et avec des pratiques différentes (agriculture biologique et conventionnelle, sols drainés et non drainés). Des informations seront obtenues sur le transfert de la pollution plastique du sol vers l'eau, par infiltration, érosion et/ou ruissellement, en particulier par les drains agricoles.

Enfin, pour le compartiment aquatique, une approche combinée va cibler le rapport entre les particules de microplastiques et particules en suspension dans l'eau ainsi que les sédiments. Un intérêt particulier sera apporté aux événements de temps de pluie qui représentent des flux élevés de matériel particulaire et potentiellement de plastiques. En déployant cette approche intégrée sur l'ensemble du continuum atmosphère-sol-rivière, des bilans annuels de microplastiques seront établis,



permettant un gain de connaissances précieux sur le transfert de cette pollution entre compartiments et en exutoire du bassin versant.

À terme, un volet modélisation sera rajouté. L'objectif sera de rassembler l'ensemble des données mesurées sur les concentrations en microplastiques et les utiliser pour évaluer et modéliser les variations spatiotemporelles des flux de microplastiques dans les rivières du bassin. Cette approche permettra d'identifier et hiérarchiser les sources ponctuelles et diffuses sur le territoire. Un modèle adapté à un bassin versant agricole de petite taille sera comme première étape vers un changement d'échelle vers des territoires plus complexes comme le bassin de la Seine.

Programme 2025 – 2026 :

L'analyse de microplastiques s'effectuera à l'aide de l'expertise développée lors de phase précédente du programme. Elle se base principalement sur la cartographie μ IRTF par transmission — de 25 à 500 μm et à de la Py-GC-MS — $<500 \mu\text{m}$. Néanmoins, si la phase précédente a démontré la pertinence de combiner les deux méthodes, quelques tests et développements complémentaires sont nécessaires afin d'optimiser cette association. Ce travail sera primordial lors de la première année.

Les deux premières années vont aussi permettre de faire l'ensemble des campagnes nécessaires sur les cours d'eau et les drains agricoles. Comme indiqué précédemment, nous allons nous intéresser aux particules en suspension dans l'eau ainsi qu'aux sédiments. Pour les particules en suspension, un intérêt particulier sera apporté aux événements transitoires de temps de pluie. Ce bassin versant est particulièrement réactif aux événements pluvieux avec une augmentation des débits rapide et brève, les crues « flash ». L'échantillonnage des particules en suspension se fera de deux manières : par pompage et filtration séquentielle (300 μm et puis 10 μm) in situ de grands volumes (plusieurs centaines de litres) et avec des pièges à sédiments qui seront déployés afin d'intégrer les particules qui se déposent.

Co-financement :

Cette action bénéficiera du soutien d'une thèse financée par l'ADEME et l'ENPC et d'un postdoctorat financé par le projet PLASTIVAL (OFB et ADEME).

4.1.3 Dynamique spatiotemporelle de la contamination à l'antimoine

Cadre pluriannuel :

L'antimoine est un métalloïde toxique dont les concentrations sont importantes en milieu urbain, avec plusieurs ordres de magnitude au-dessus du fond géochimique. Parmi les sources répertoriées en milieu urbain figurent les émissions liées au trafic routier des véhicules (plaquettes de freins notamment), le lessivage de matériaux urbains (*p. ex.* peintures et plastiques) ou encore l'incinération de déchets. Toutefois, des connaissances sont manquantes sur les contributions de ces différentes sources dans le schéma de contamination globale. De plus, à l'échelle du contaminant, sa dynamique géochimique avec les surfaces minérales et composantes organiques aux petites échelles reste mal comprise, en particulier dans les systèmes sédimentaires artificialisés. En effet, l'antimoine présente différents degrés rédox (+III et + V) et des affinités chimiques avec différents ligands (O, S, et Cl), rendant très variables ses propriétés de mobilité entre phase solide et phase dissoute notamment aux interfaces rédox qui sont le siège de réactions en absence d'oxygène. La connaissance de sa chimie dans l'environnement urbain est donc essentielle pour évaluer son potentiel de toxicité vis-à-vis des écosystèmes et produire des variables d'entrées indispensables pour bien définir l'éco-exposome. En particulier, les formes de Sb en phase dissoute et sa partition avec les phases solides restent des

questions non résolues en contexte urbain en fonction des sources considérées, de même que l'influence des réactions catalysées par les microorganismes sur la chimie de Sb. Les études menées lors de la phase 8 ont en particulier montré que l'antimoine d'origine routière présentait une forte réactivité chimique avec de nombreuses et diverses formes impliquées depuis son émission jusqu'à son dépôt et vieillissement en réservoir sédimentaire (continuum route-bassin de rétention).

Dans la phase 9 du PIREN-Seine, et en interfaçage avec le projet ANR Antimoine (2023-2027), nous souhaitons nous focaliser principalement sur deux actions de recherche :

- Étudier la réactivité chimique à court terme de l'antimoine émis par le trafic routier lors d'une campagne d'échantillonnage par de temps de pluie sur un bassin autoroutier sélectionné,
- Étudier les caractéristiques de la contamination par Sb sur le long terme via l'étude d'archives sédimentaires du BV de la Seine sur des carottes sélectionnées dans des bras morts de la Seine en aval de l'agglomération parisienne.

La première action documentera sur le temps court la partition solide/liquide de Sb lors d'un événement ponctuel en contexte routier contaminé, et donc la part de l'eau dans les transferts de ce contaminant. L'action d'étude des archives sédimentaires pourra en comparaison donner une idée de l'évolution sur le temps long des transferts de Sb dans la zone critique urbaine à l'échelle de la région parisienne, et potentiellement des indications sur l'évolution des sources ou des conditions de dépôt, notamment lors des dernières décennies qui n'ont pas été mesurées pour Sb.

Programme 2025 – 2026 :

Lors des deux premières années, les travaux concernant l'antimoine seront focalisés sur les tâches définies dans l'ANR Antimony dont l'objectif principal est de mieux comprendre le cycle biogéochimique de Sb en milieu urbain. En particulier seront exploitées en détail des données produites en fin de phase 8 du PIREN-Seine, et de nouvelles approches en systèmes modèles de laboratoire (combinant microbiologie, chimie isotopique et chimie du solide à l'échelle atomique) seront déployées pour étayer nos hypothèses sur la dynamique de cet élément à la chimie complexe dans les milieux de surface urbains. Les travaux produits auront alors vocation à nourrir la discussion concernant la dynamique de ce contaminant dans le cadre du programme PIREN-Seine.

En années 3 et 4 de la phase 9, nous proposons de réaliser nos campagnes de prélèvements en phasage avec l'ANR Antimoine. La campagne de prélèvement par temps de pluie donnera accès à la connaissance de la partition de Sb entre phase solide et phase dissoute lors d'un événement de lessivage des routes caractéristique des situations de transfert de ce contaminant en milieu urbain, en associant des mesures de géochimie (ICP-MS), de géochimie isotopique (MC-ICP-MS, collaboration HSM Montpellier) et de spéciation solide (XAS). Ainsi, grâce à un échantillonnage à bonne résolution temporelle pendant un événement de pluie nous pourrions définir sous quelle forme le Sb se déplace entre les compartiments de stockage et quels sont les drivers physicochimiques contrôlant sa mobilisation vers la phase dissoute, composante importante de l'éco-exposome. Des carottes sédimentaires prélevées lors de l'ANR Antimony en aval de Paris notamment serviront de base d'étude pour comprendre la dynamique de Sb sur le temps long et son potentiel de relargage vers les eaux porales, en tant que vecteurs de la contamination vers les eaux souterraines. En parallèle, la contribution des communautés microbiennes au changement de spéciation de l'antimoine sera évaluée en quantifiant par qPCR des gènes impliqués dans les processus d'oxydation et/ou réduction en ciblant les communautés totales et métaboliquement actives au sein des sédiments des carottes.

Co-financement :

L'ANR Antimoine (2023-2027) financera l'embauche d'une doctorante (HSM Montpellier), et de deux chercheurs postdoctoraux (IMPMC/LSCE et M2C-METIS).



4.1.4 Archives sédimentaires : Sources historiques et trajectoires de contamination

Cadre pluriannuel :

Cette action a pour objectif de renseigner et comprendre les enregistrements en contaminants organiques, inorganiques et microplastiques dans les archives sédimentaires. Les activités anthropiques génèrent des flux importants de contaminants de toute nature, dont l'ampleur a varié au cours du temps. Partant de ce constat, cette proposition vise à poursuivre et amplifier l'action originale entreprise dans le PIREN-Seine depuis 2004, et de capitaliser sur les avancées réalisées durant la phase VIII du programme. Plusieurs nouvelles archives ont en effet été prélevées et analysées durant cette dernière phase (Vernon, étang Saint-Denis, Boissise-le-Roi), mais nécessitent d'être encore pleinement exploitées. Dans une logique amont-aval de détermination de l'impact de l'agglomération parisienne, il apparaît de plus nécessaire de se focaliser davantage sur des zones d'intérêt comme la Seine parisienne non investiguée jusqu'à lors, en amont de la confluence de l'Oise et du rejet de Seine-Aval et des sources à caractériser plus finement, en utilisant des enregistrements contrastés des retombées atmosphériques en contaminants dans Paris intra-muros afin d'affiner la spatialisation des trajectoires historiques de contamination.

Le cortège de traceurs à analyser, une fois les archives datées, correspond à un panel représentatif de différents types de contaminations, comme les produits pharmaceutiques indicateurs des pressions ponctuelles, les produits phytosanitaires, les composés poly et per-fluoroalkylés (PFAS) et les microplastiques, de sources plus diffuses et dont les contributions atmosphériques, notamment, demeurent à préciser. De plus, et dans l'objectif de maximiser le potentiel du signal moléculaire contenu dans ces archives, une analyse non-ciblée sera réalisée à titre exploratoire et pourra permettre i) d'identifier des familles de contaminants pertinentes, mais non ciblées initialement et ii) de réaliser a posteriori une analyse rétrospective si de nouvelles problématiques/régulations apparaissent.

Avant de réaliser les analyses des contaminants, ces archives seront datées à l'aide des radionucléides naturels (^{210}Pb s) et artificiels (^{137}Cs) pour contraindre la fenêtre temporelle qu'elles permettent d'observer. Ensuite, une caractérisation de la composition du sédiment et de son évolution au sein des archives sera réalisée et permettra d'accéder aux paramètres généraux, tels que la granulométrie, le carbone organique, la caractérisation de la MO, des éléments de minéralogie, etc. Ces paramètres permettront de normaliser les teneurs en contaminants observées afin de pouvoir comparer les données d'un site à l'autre, d'une époque à l'autre.

Programme 2025 – 2026 :

Les carottages seront prévus entre 2025 et 2026 et seront le préalable au déploiement des analyses décrites ci-dessus.

2025 : Détermination des archives pertinentes :

- En Seine parisienne, prospection de sites autour de Maisons-Laffitte, à l'issue d'un travail cartographique en vue d'un carottage-test visant à évaluer le potentiel de datation de l'archive ;
- Carottage du Lac de Daumesnil, bois de Vincennes ;
- Exploitation de l'archive amont de Boissise-le-Roi (datation + analyses financées en phase 8).

2026 :

- Carottage du site de Maisons-Laffitte validé, le cas échéant, lors de la prospection de 2025 ;
- Carottage du lac inférieur, Bois de Boulogne;

- Datation des archives Maisons-Laffitte et Lac de Daumesnil ;
- Analyse des contaminants de l'archive du lac de Daumesnil (HAP, PCB, PFAS, Corg, N, microplastiques, métaux).

Co-financement :

Cette action s'appuiera sur l'ANR Antimony pour le recarottage du site amont (Boissise le Roi) et aval (Vernon).

4.1.5 Mécanismes naturels de dégradation et transformation des contaminants organiques

Cadre pluriannuel :

La multiplication des contaminants organiques et de leurs produits de transformation, parfois plus toxiques que les composés parents, est une problématique complexe qui interroge régulièrement les approches à mettre en œuvre pour contrôler de façon pérenne la qualité des eaux souterraines et des eaux de surface. Une des zones d'ombre importante dans ces processus concerne l'identification et la localisation des réacteurs biogéochimiques qui conduisent à la transformation des contaminants organiques, que ce soit en milieu naturel ou en milieu urbanisé. Ceci concerne par exemple les milieux naturels ouverts, en amont des captages utilisés pour la potabilisation, ou encore les circuits et réservoirs urbains en amont des dispositifs d'assainissement. Si les processus de biodégradation microbienne ou de sorption sont généralement considérés comme les facteurs principaux contrôlant le devenir des contaminants organiques, les découvertes récentes sur les réactions radicalaires catalytiques intervenant à la surface des minéraux naturels lors des épisodes d'oxygénation ouvrent des perspectives importantes pour mieux comprendre l'évolution des polluants (Fang et al. 2013 ; Ardo et al. 2015 ; Lee et al. 2015 ; Chen et al. 2019 ; He et al. 2020 ; Cheng et al. 2020 ; Morin et al. 2023).

Les sols ou les dépôts sédimentaires soumis à des cycles d'oxydo-réduction causés par des fluctuations hydrologiques sont particulièrement reconnus comme propices à la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) telles que le radical hydroxyle (OH^\bullet) liés à l'oxydation des minéraux ferreux naturels (argiles riches en Fe(II) en particulier) (Page et al. 2013 ; Tong et al. 2016 ; Du et al. 2021a,b ; Liao et al. 2019 ; Zhao et al. 2023). De façon marquante, quelques études récentes montrent que ces interfaces redox de l'environnement (plaines alluviales et environnements lacustres en particulier) sont potentiellement le siège de processus de dégradation ou transformation abiotique de contaminants organiques liées à des réactions d'oxydation par ces espèces réactives de l'oxygène naturellement produites au cours des cycles redox (Tong et al. 2016 ; Xie et al. 2020). Ceci étant, très peu de données existent actuellement sur ces processus, sur leur distribution spatiale, leur cinétique et leur importance potentielle dans le cycle des contaminants, à fortiori dans le bassin de la Seine. L'action que nous avons menée au cours de la phase 8 du programme a mis en évidence la formation de radicaux libres dans des sols alluviaux de l'Orgeval et en amont de la Bassée ainsi que dans des bassins de rétention autoroutiers, avec des effets potentiels sur les contaminants pesticides et HAP, respectivement (Morin et al. 2023 b). Ces résultats mettent également en évidence une variété d'espèces radicalaires dont la présence et la réactivité vis-à-vis des contaminants sont peu ou pas évaluées dans la littérature (Morin et al. 2023a).

L'action proposée pour la phase 9 a pour objectif d'évaluer les cinétiques de dégradation ou transformation de contaminants organiques au cours de cycles redox affectant des sols alluviaux ainsi que des dépôts sédimentaires en milieu naturel ou urbain afin de caractériser les zones géographiques et les compartiments géochimiques les plus réactifs vis-à-vis de ces réactions naturelles de dégradation des contaminants. La phase 9 du programme bénéficiera des méthodologies qui ont été développées



par nos équipes par le passé (Ardo et al. 2015) et au cours de la phase 8, à savoir, la mesure des radicaux par la Résonance Paramagnétique électronique (RPE) avec piégeage de spin (Morin et al. 2023a), la spéciation du fer par spectrométrie d'absorption X sur rayonnement synchrotron, la mise en œuvre d'expériences de cycles redox artificiels en laboratoire et le suivi des contaminants en phase solide et aqueuse par GC-MS et LC-ICP-MS. Elle bénéficiera également des résultats de la phase 8 qui ont permis d'identifier des sites présentant des niveaux de contamination permettant un suivi quantitatif des xénobiotiques et de leurs produits de dégradation (Morin et al. 2023 b).

Programme 2025 – 2026 :

Au cours de la première année du programme, les différents sites seront ciblés pour effectuer des expériences de cycles d'oxydoréduction en laboratoire visant à dégrader les contaminants. Les sites de bassins de rétention autoroutiers seront ciblés pour évaluer les transformations du cortège des HAP au cours des cycles redox expérimentaux, grâce à des mesures GC- ou LC-MS. Les PFAS déjà identifiés en concentration mesurable dans la série des sols de l'Orgeval et de la Bassée et dans les sédiments de bassins autoroutiers, seront également suivis au cours des cycles redox. Sur l'Orgeval, les cortèges de pesticides seront suivis par LC-ICP-MS dans des sols alluviaux en collaboration avec ECOSYS dans le cadre de l'ANR DEPOLECO. En parallèle l'oxydo-réduction des phases minérales réactives sera suivie par spectrométrie d'absorption X (après évaluation par les comités de programme des synchrotrons), Microscopie électronique à Balayage et Spectrométrie Mössbauer.

Lors de la deuxième année du programme, une attention particulière sera portée à la compréhension des mécanismes de dégradation ou de transformation de certaines molécules d'intérêt, choisies pour leur sensibilité à l'oxydation, en fonction des conditions physicochimiques et des types de radicaux déterminés par RPE. Les effets des ligands organiques et inorganiques, en particulier les phosphates, seront particulièrement recherchés (Morin et al. 2023a). Un autre aspect concernera l'analyse des effets possibles de ces réactions sur les profils de contaminants dans les archives sédimentaires lorsqu'elles sont soumises à des fluctuations redox.

Dans la suite du programme, l'objectif consistera à identifier les synergies entre les processus biotiques et abiotiques dans les mécanismes de dégradation des contaminants. Ceci passe en premier lieu par le rôle des microorganismes ferriréducteurs qui régénèrent les phases minérales ferreuses dans les sols et sédiments lors des épisodes de saturation en eau (Huang et al. 2020 ; Wan et al. 2022). Le second aspect concerne l'identification de séquences réactionnelles de transformation ou dégradation des molécules xénobiotiques faisant intervenir des étapes abiotiques et biotiques au cours des étapes réductives et oxydantes des cycles redox (Schaefer et al. 2018). Dans un premier temps des expériences en conditions stériles ou non permettront de révéler l'influence des facteurs biotiques. Ensuite, un suivi des activités microbiennes pourra être mis en œuvre au travers d'approches de type cultures dans un premier temps. La biologie moléculaire pourra aussi être proposée si des partenaires du programme sont intéressés par les résultats obtenus.

Co-financements :

L'étude bénéficie d'un soutien de l'ANR DEPOLECO (2021-2025, IMPMC-LRS-ECOSYS, <https://anr.fr/Projet-ANR-21-CE04-0009>) qui finance notamment la thèse de Elora Bourbon (ED 398) sur la période 2022-2025 « Dégradation naturelle de polluants organiques dans les sols, sédiments et eaux souterraines : nouveaux mécanismes écocompatibles sans oxydants forts ». Un doctorant bénéficiant d'une allocation de l'EDSC de l'Université de Bordeaux sera impliqué en 2025 et 2026.

4.1.6 Biofilms microbiens et transfert de polluants

Cadre pluriannuel :

Les biofilms microbiens constituent un compartiment important des milieux naturels. Ces structures sont composées de microorganismes dont les cellules sont encapsulées dans une matrice d'exopolymères autosécrétée. Il est maintenant établi qu'il s'agit du mode d'organisation principal des microorganismes (environ 70 %), et qu'on les retrouve dans pratiquement tous les environnements à la surface de la Terre. Ainsi, du fait de leur forte réactivité physicochimique et de leur capacité de rétention élevée, les biofilms constituent un acteur potentiellement important dans le transfert de polluants dans le bassin versant de la Seine. En effet, au cours de la Phase 8 du PIREN-Seine, il a pu être montré que les biofilms prélevés en Seine accumulaient très fortement les contaminants organiques (PFAs, antibiotiques) et les éléments traces métalliques (6 ordres de grandeur pour Pb et Cr par rapport à la fraction dissoute), et qu'ils étaient aussi capables de modifier l'état d'oxydation d'éléments clés des écosystèmes comme Mn et Fe. Ainsi, des microenvironnements oxydants et réducteurs coexistent au sein de ces structures microbiennes, et jouent certainement un rôle fondamental dans le transfert de polluants aux interfaces avec la colonne d'eau de la Seine. Nous proposons ici de poursuivre ces investigations concernant la contribution des biofilms sur les flux de polluants, démarrées au cours de la phase 8. Pour ce faire, 3 sous actions seront abordées :

- Dynamique de formation de colloïdes dans les biofilms microbiens

Une des conclusions de l'action PIREN phase 8 est que les biofilms modifient l'état d'oxydation de Fe et Mn, deux éléments clés dans le transfert de polluants dans l'environnement, et induisent la formation de minéraux de tailles nano- à micrométriques de sulfures de fer (pyrite framboïdale) et d'oxydes de manganèse. La génération de ces phases minérales constitue une étape importante des processus d'accumulation de Fe et Mn, qui contrôle en retour le cycle de ces éléments dans la Seine. Nous proposons ici d'étudier la dynamique de formation/croissance de ces phases colloïdales en quantifiant leur présence au sein des biofilms, via des approches de type « *single cell* » développées pour l'analyse de nanoparticules métalliques. De plus, il sera précisé la proportion de particules de Fe et Mn provenant de la colonne d'eau et piégée dans les biofilms et la proportion de particules de Fe et Mn formés in situ dans ces structures microbiennes.

- Devenir des nanoparticules au contact de biofilms microbiens

Les phases 7 et 8 du PIREN-Seine ont mis en évidence la présence de nanoparticules métalliques d'origine anthropique dans la Seine, notamment du nano-Ag. Cependant l'impact des biofilms sur le transfert environnemental de ces nanoparticules n'est pas connu, alors qu'il a été montré des capacités de rétention très fortes pour les métaux dans ces structures. Nous proposons ici d'étudier à la fois les propriétés de piégeage de nanoparticules d'Ag par les biofilms microbiens de la Seine, mais aussi d'estimer la persistance de ces nanoparticules dans ces communautés aux capacités oxydantes, afin de déterminer si les biofilms sont capables de catalyser la dissolution de nanoparticules comme cela a pu être montré dans des expériences de laboratoire (nanoparticules de type quantum dots) ou au contraire de maintenir ces nanoparticules via des réactions de passivation de surface. Il sera aussi important de mettre en évidence quel rôle peut jouer la MOD lors de ces processus d'interaction, car nos travaux antérieurs ont démontré que la stabilité des nano-Ag dans les eaux du bassin versant de la Seine était contrôlée par les variations de la concentration en MOD. Des études sur le rôle de MOD de différente nature et origine (biofilm vs terrigène) sont donc nécessaires pour comprendre le devenir de ces nanophasés.

- Cycle des métaux critiques : vanadium, platine et palladium

Enfin, plusieurs éléments chimiques sont considérés par la Communauté européenne comme métaux critiques qui suscitent un intérêt stratégique fort, en lien avec la transition énergétique et l'accès à des matières premières rares face à une demande importante. Parmi ces éléments, le vanadium, le

palladium et le platine jouent un rôle important et présentent par ailleurs des propriétés physicochimiques particulières. Ainsi, le vanadium est un élément très sensible à l'oxydo-réduction et on peut faire l'hypothèse que sa spéciation et son devenir environnemental seront fortement impactés lors de son interaction avec les biofilms de la Seine. Des approches conjointes de spectroscopie d'absorption des rayons X et de mesure de signatures isotopiques permettront d'en préciser le cycle au sein de biofilms de Seine. Le palladium et le platine sont des cations dits « mous » en chimie et présentent une affinité forte pour les molécules organiques thiolées (fonctions SH). Cependant les processus de transfert en milieux naturels sont encore mal connus pour ces deux éléments et seront certainement en partie contrôlés par leurs interactions avec les biofilms microbiens qui présentent des concentrations élevées en groupement thiols. Un objectif de cette sous-action est ainsi de définir les capacités d'immobilisation de Pd et Pt au sein de ces communautés et de quantifier l'importance des groupements thiols et des processus de réduction dans cette immobilisation *via* des approches de spectroscopie d'absorption des rayons X.

Programme 2025 – 2026 :

Les biofilms seront prélevés en concertation avec l'action A4B3.1 sur l'Orge (cf. protocole phase 8). Une fois échantillonnés, ceux-ci seront préparés au laboratoire en atmosphère contrôlée (boîte à gants).

Un premier travail consistera en la mise au point d'un protocole d'extraction des phases minérales contenues dans les biofilms. Pour cela, des protocoles de digestion de matière organique développés au cours de la phase 8 (action nanoparticule où celles-ci étaient isolées à partir de chairs de dreissènes) seront adaptés aux biofilms microbiens.

Dans un second temps une analyse en *single cell* ICP-MS, technique développée à l'IPGP sur des eaux naturelles et des matrices biologiques, permettra de quantifier la teneur en particules de manganèse et de sulfure de fer au sein des biofilms et de les comparer avec la colonne d'eau. Ce même travail sera effectué pour quantifier la présence de nanoparticules d'Ag dans ces structures.

Des analyses en XPS (spectroscopie de photoémission de rayons X) seront effectuées sur des biofilms préparés en lames minces afin d'accéder à une quantification globale des niveaux d'oxydo-réduction pour plusieurs éléments sensibles au redox. Ceci permettra de cartographier l'évolution des conditions d'oxydo-réduction au sein de biofilms à partir des potentiels d'oxydo-réduction de chaque élément analysé. Ainsi il sera possible de préciser les conditions de formation de sulfures de Fe et d'oxydes de Mn en ayant une meilleure connaissance du potentiel oxydant et réducteur local.

Plusieurs temps de faisceau pour effectuer des mesures de spectroscopie d'absorption X pour les éléments V, Pt et Pd seront demandés aux synchrotrons français SOLEIL et ESRF à partir de la seconde année. Ils permettront d'accéder à la spéciation de ces éléments au sein des biofilms microbiens et ainsi de déterminer quels sont leurs mécanismes d'accumulation dans ces structures microbiennes. En parallèle, un développement d'approches isotopiques pour le vanadium sera développé afin d'apporter des contraintes fortes au cycle de cet élément critique dans le bassin de la Seine.

En complément de ces mesures sur des biofilms du milieu naturel, des biofilms seront installés dans des mésocosmes. Il s'agit de réaliser des expérimentations en conditions contrôlées dans de grands aquariums où seront reconstitués des environnements aux conditions physicochimiques comparables à ceux de l'Orge. C'est idéal pour suivre réellement le bilan de masse des contaminants, leur dégradation dans le temps, la dynamique des contaminants entre piégeage dans les biofilms et relargage dans la colonne d'eau, éventuellement une accumulation sur un début de chaîne trophique, tout en contrôlant la spéciation et les sources des contaminants.

Co-financements :

Cette action sera complémentaire au projet EC2CO-INSU Vanadox : Interactions entre vanadium et communautés microbiennes - obtenu (20 k€) et à l'ANR PRC « COLOSSAL » (2023-2027) : COLIOidS control the environmental fate of redox-Sensitive trAce eLements (498 k€). ANR-23-CE01-0001/

BLOC 4.2. Effets de la contamination globale sur les écosystèmes et les organismes

Ce second bloc porte sur l'évaluation des effets des multicontaminations sur les écosystèmes à différentes échelles d'organisation biologique afin d'intégrer une dimension écologique/fonctionnelle dans les relations pressions-réponses et de proposer des indicateurs globaux de l'état de santé des écosystèmes. À ces fins, les approches de biosurveillance, active ou passive, sont proposées en raison de leur pertinence environnementale pour décrire des perturbations biologiques et écologiques en conditions réelles. Ces approches reposent sur des suivis chimiques proposés dans le cadre d'étude de l'écodynamique des contaminants (cf. ci-dessus) via des déploiements couplés sur des sites ateliers à large échelle temporelle afin d'identifier des interactions entre dynamiques chimie et biologique/écologique et d'évaluer la sensibilité de biomarqueurs multiniveaux aux variations spatiotemporelles des multicontaminations.

Lors des phases précédentes, de nombreux biomarqueurs à l'échelle de la cellule ou de l'organisme ont été développés en tant qu'indicateurs précoces de toxicité. Néanmoins, de nouveaux enjeux ont été identifiés autour de leur généricité vis-à-vis de la contamination globale, de leur sensibilité aux fluctuations de l'exposome, de leur pertinence au regard de facteurs confondants et de leur représentativité écologique.

Ainsi les actions proposées visent à étudier ces relations pressions-réponses à différentes échelles biologiques afin de faire le lien entre la contamination des milieux et les niveaux de bioaccumulation, leurs impacts à différents niveaux trophiques jusqu'à la santé animale. Les actions utiliseront les dreissènes, les gammarels, les poissons et leurs parasites, et la communauté des macroinvertébrés, afin d'étudier ces relations pressions-réponses et aussi leurs implications pour la biosurveillance.

L'ensemble de ces actions sont complémentaires au sein de ce bloc 2, mais aussi avec les blocs 1 et 3 de cet axe. Il comprend 6 actions pour un budget prévisionnel de 338,2 k€ pour l'ensemble de la phase 9.

4.2.1 Biosurveillance de contaminants chimiques et biologiques

Cadre pluriannuel :

L'objectif de cette action sera d'utiliser une approche intégrative pertinente basée sur la transposition active d'organismes sentinelles (le bivalve filtreur *Dreissena polymorpha*) in situ pour caractériser la biodisponibilité de contaminants chimiques (p. ex., mercure, PFAS, HAP, PCB) et biologiques (p. ex., virus, protozoaires, cyanotoxines et cyanopeptides émergents), majoritairement dans des sites lotiques, mais aussi dans des sites lenticules constituant des réservoirs de développement de pathogènes potentiellement transférés dans le continuum.

Les écosystèmes aquatiques sont les réceptacles finaux d'un grand nombre de contaminants (chimiques et biologiques) émis par les activités anthropiques, notamment en lien avec les activités agricoles, industrielles ou urbaines. Au-delà de la contamination chronique et diffuse des milieux aquatiques, ces derniers sont aussi soumis à des apports ponctuels associés à des événements

d'origine accidentelle ou liés à des événements météorologiques/hydrologiques extrêmes (étiages sévères, orages, crues). Ces situations peuvent engendrer des pics de pollutions ou, inversement, une dilution des niveaux de contamination selon les familles de contaminants ciblés et le moment considéré. Ce caractère très dynamique complexifie l'évaluation de l'état de contamination des masses d'eau sur la base d'analyse de prélèvements ponctuels. Pour lever ces limites, différents développements de capteurs/systèmes intégrateurs passifs ou basés sur l'utilisation du biote ont été proposés. Concernant le biote, si la mesure de la fraction accumulée permet de faciliter l'analyse (concentrations plus élevées pour certains contaminants) et de mieux intégrer les fluctuations temporelles du niveau d'exposition, les caractéristiques biométriques représentent toutefois des facteurs pouvant moduler la charge accumulée des contaminants. Pour assurer au mieux une comparaison des niveaux de contamination de masses d'eau sur une large échelle géographique ainsi qu'au cours du temps, il a été proposé et développé ces dernières années un bioessai basé sur l'utilisation de moules zébrées (*D. polymorpha*). À cette fin, des individus provenant d'une même population et les plus standardisés possibles (même âge, taille, historique...) sont engagés selon une durée maîtrisée sur les sites d'intérêt. Cette méthodologie validée pour la surveillance des masses d'eau (avec un référentiel pour certains contaminants) apparaît comme pertinente pour améliorer l'étude spatiale et temporelle de la contamination chimique et biologique/microbiologique dans un contexte d'accroissement de la fréquence de survenue d'événements météorologiques extrêmes.

L'objectif sera de mieux caractériser des facteurs (p. ex., pluviométrique, hydrologique, thermique) susceptibles d'influencer la biodisponibilité des différents contaminants étudiés à travers une approche temporelle à long terme (18 mois) nécessaire pour couvrir l'ensemble de l'éco-exposome d'une part et pour identifier l'impact éventuel d'événements extrêmes (p. ex., étiage, orages ou crue notamment) d'autre part. De plus, la part attribuable au transfert trophique de certains polluants (mercure, PFAS, HAP, PCB) sera évaluée en comparant le profil de bioaccumulation des dreissènes avec celui des particules en suspension (approche intégrative : pièges à particules) et de la phase dissoute (PFAS, pesticides : échantillonneurs passifs). Afin de faire le lien entre la dynamique de la matière organique (MO) et l'écodynamique des contaminants, la caractérisation simultanée de la MO menée depuis la phase 7 sera poursuivie. L'enjeu est d'appréhender quantitativement et qualitativement la MO comme facteur de contrôle potentiel de la bioaccumulation.

Un volet annexe d'étude du rôle du biote dans la métabolisation des contaminants sera mené en parallèle pour deux contaminants biologiques afin d'évaluer d'éventuels processus de dégradation ou de biotransformation et de mieux comprendre l'écodynamique des produits de dégradation, préalable à toute future évaluation toxicologique. Ainsi, les produits de métabolisation des cyanotoxines par la dreissène seront étudiés ainsi que la viabilité des protozoaires accumulés par le bivalve.

Les résultats de bioaccumulation acquis permettront d'identifier des périodes critiques de (multi)contamination et de caractériser la composition de l'exposome en conditions hydrologiques contrastées, et seront mis en relation avec les résultats de l'action « Biomarqueurs » (A4B2.2) pour relier les phénomènes de multi-exposition aux réponses toxiques associées. Notamment, cette relation sera formalisée par une approche d'intégration de données de type Poids de la Preuve qui aura pour ambition de faire le lien entre les deux actions proposées. Ainsi, l'ensemble des métriques autour de la biosurveillance du bassin de la Seine incluant les réponses biologiques (biomarqueurs), les niveaux d'imprégnation chimique et biologique, ainsi qu'éventuellement les niveaux de contamination environnementale, sera intégré dans une approche de type Poids de l'Evidence (Weight-of-Evidence, WOE). Cette approche a déjà été appliquée dans le cadre de la phase VI du PIREN-Seine (Barjhoux et al. 2018) autour du gammare pour les aspects biomarqueurs et bioaccumulation. Il s'agira donc, dans la phase VIII, de poursuivre le développement de cette démarche dans un contexte de biosurveillance en ajoutant un volet contamination biologique en plus du volet chimique.

L'ensemble de ces données seront mises en regard avec les données météorologiques et hydrologiques ainsi qu'avec les données de transferts sédimentaires acquises par les autres équipes membres du PIREN pour établir un lien entre temporalité et intensité des ruissellements, débit des

cours d'eau, niveaux et dynamiques de contamination des milieux aquatiques. Cette approche sera déclinée sur plusieurs sites représentatifs de différents types d'aménagements du bassin versant et des différentes pressions (urbaines, industrielles et agricoles).

L'approche globale temporelle (biosurveillance sur plusieurs saisons) et spatiale (affluents et axe fluvial) élargie proposée dans cette phase permettra aussi d'évaluer des transferts de contaminant depuis le bassin versant jusqu'à l'estuaire (thème 5).

Seront investigués les sites ateliers étudiés depuis plusieurs années dans le cadre du PIREN-Seine, présentant des pressions chimiques, hydrologiques et biologiques contrastées : l'axe fluvial de la Seine (Marnay/Bougival/Triel/Poses), mais aussi ses affluents comme la Marne et l'Oise soumis à des pressions urbaines et/ou agricoles importantes.

Programme 2025 – 2026 :

Pour les deux premières années de cette phase 9 du PIREN-Seine, une stratégie de déploiement à long terme du bioessai dreissène sera appliquée afin d'appréhender la qualité des masses d'eau de zones géographiques d'intérêt selon différents scénarios : période d'étiage, période de crue, épisodes orageux (à l'instar de ce qui est testé actuellement dans le cadre du GIPSA et de la ZA Seine, 2024). La stratégie d'encagement du bivalve *D. polymorpha* est donc proposée sur une période totale de 18 mois, avec 4 campagnes d'encagements de 3 semaines, afin de couvrir différentes conditions météorologiques, hydrologiques et différentes temporalités de développement de pathogènes ou de transfert de polluants depuis les bassins versants étudiés.

Les polluants recherchés seront ciblés en fonction de la temporalité de leur présence in situ d'une part et du type de conditions hydrologiques dans lesquelles ils sont retrouvés d'autre part (p. ex., eaux courantes versus stagnantes, périodes d'étiage ou de fortes pluies), et seront :

- Des contaminants d'origine anthropique : mercure et éléments traces métalliques, HAP et PCB ;
- Des contaminants émergents d'origine anthropique : les PFAS (approche ciblée + approche globale TOP) ;
- Une analyse non ciblée des micropolluants dans les échantillonneurs passifs de type POCIS (pour mieux caractériser l'exposome des dreissènes) ;
- Des contaminants microbiologiques d'origine anthropique urbaine (fécale) : virus et protozoaires ;
- Des contaminants microbiologiques se développant dans les eaux stagnantes ou en période d'étiage des eaux courantes : les cyanotoxines et cyanopeptides émergents suivis ;
- La caractérisation de la MO sera systématiquement réalisée en phase dissoute (MOD), mais aussi dans la phase particulaire (MOP) si des quantités suffisantes de matériel particulaire sont disponibles.

Les sites étudiés les deux premières années seraient l'axe fluvial Seine (M/B/T/P), La Marne (Champigny) et l'Oise (Villers St Paul et Cergy-Pontoise).

Co-financements :

Cette action bénéficiera des projets ANR MercurFood et PNR-Est ToxModel, des allocations de thèse DiMer, MeSeine, de la thèse de Quentin Dubois (allocation doctorale UB) et du postdoctorat Camille Pasquet (ANR TRANSPRO)



4.2.2 Évaluation multi-échelles de la réponse des biomarqueurs chez la dreissène pour une application en biosurveillance environnementale

Cadre pluriannuel :

L'utilisation du biote pour la caractérisation des masses d'eaux représente une opportunité non seulement comme matrice supplémentaire aux eaux et sédiments pour la surveillance chimique et sanitaire des milieux aquatiques, définie dans le cadre de la Directive Cadre Européenne sur l'eau (ex de l'établissement de NQE biote) (directive 2000/60/CE), mais également pour la définition d'outils basés sur les effets biologiques (biomarqueurs). Parmi les espèces sentinelles d'intérêt pour l'évaluation de la qualité des masses d'eaux continentales figure la moule zébrée, communément appelée dreissène (Pallas, 1771). Lors de la phase 8 du PIREN-Seine, le choix stratégique d'étudier des marqueurs hématocytaires sur des organismes les plus standardisés possibles a permis de mettre en évidence une variabilité spatiale et temporelle des pressions immunotoxiques et génotoxiques le long de l'axe Seine (gradient amont-aval : Champigny-sur-Marne, Choisy-le-Roi, Bougival, Conflans Ste Honorine, Triel-sur-Seine). Une analyse intégrée des biomarqueurs tend à démontrer qu'il pourrait y avoir plusieurs schémas, associés ou non, de dommages et/ou de réponses face aux pressions génotoxiques et immunotoxiques du milieu. Cette étude, par son approche intégrative de multiples marqueurs autour d'un même modèle cellulaire et à l'échelle individuelle, est une première étape visant à comprendre la signification de la réponse apportée par les biomarqueurs hématocytaires. Il convient dorénavant de préciser l'étendue et les conséquences à plus long-terme de l'exposition des organismes aux pressions immunotoxiques et génotoxiques de leur milieu. C'est à ce titre que les biomarqueurs hématocytaires pourront être considérés non seulement comme des indicateurs de toxicité précoce, mais également comme indicateurs prédictifs de dysfonctionnement physiologique, renforçant ainsi leur pertinence dans une approche de biosurveillance des milieux. L'analyse immunotoxique et génotoxique au niveau des hématocytes, reflet de l'état de santé des individus, sera complétée par la mesure de marqueurs associés à l'état énergétique et à la reproduction en lien avec la gamétogénèse et la qualité spermatique qui a montré être prédictive d'effets délétères à plus long-terme sur le développement embryon-larvaire des descendants ; l'ensemble de ces perturbations étant susceptible de mettre en péril la dynamique et la pérennité des populations exposées.

Les travaux proposés dans la phase 9 du PIREN-Seine visant au changement d'échelle dans la mesure et l'interprétation de la réponse des biomarqueurs permettront de renforcer les valeurs guides (référence et seuils) qui ont été établies précédemment (AERM EQUAL, OFB-AESN BIOSURVEILLANCE) et ainsi promouvoir leur utilisation dans une démarche de surveillance et d'évaluation des risques environnementaux en lien avec la contamination des masses d'eaux.

Programme 2025 – 2026 :

Pour répondre à cet objectif scientifique, il est proposé de poursuivre les travaux sur une population unique et calibrée (taille, sexe) de dreissènes, afin de permettre l'interprétation de la réponse des biomarqueurs sur le terrain face aux pressions du milieu. L'originalité de l'action proposée par rapport aux phases précédentes du PIREN tient tout d'abord à la transplantation à long-terme des dreissènes (18 à 24 mois) sur plusieurs sites ayant montré des effets biologiques contrastés, qui sont principalement situés le long de l'axe Seine suivant un gradient amont-aval (i.e. Marnay, Bougival, Triel) et de ses principaux affluents (Marne-Lac du Der, Oise). Les réponses hématocytaires, associées aux effets à plus long terme sur la croissance et la survie mesurées de façon individuelle, non létale et répétée à intervalles réguliers (1,5 à 2 mois) pendant la phase de transplantation seront mises en regard avec la caractérisation des facteurs (physico)-chimiques du milieu et de l'exposome des organismes. Cette étude permettra *in fine* de modéliser la probabilité de survie et la cinétique de croissance des dreissènes en fonction du site de transplantation d'une part et du niveau/catégorie de réponse des biomarqueurs hématocytaires d'autre part. Des expérimentations seront menées en

parallèle en conditions contrôlées de laboratoire sur les marqueurs hématocytaires et les marqueurs de qualité spermatique (sur le principe du *stress on stress*), afin de renforcer l'interprétation des réponses biologiques acquises sur le terrain.

À l'issue de la campagne de transplantation sur les deux premières années du programme (années 2025-2026), un bilan sera établi afin d'orienter la campagne de transplantation long-terme des dreissènes lors de la seconde phase, en termes de nombre de sites et cinétiques de prospection (années 2027-2028). Comme pour la phase 8, la sélection des sites d'études et des périodes de campagnes se fera en concertation avec les partenaires du PIREN-Seine impliqués dans l'axe 4 qui permettront de replacer la réponse des biomarqueurs mesurés sur les dreissènes dans un contexte plus large d'évaluation de la qualité des masses d'eaux, par la prise en considération de l'état de contamination chimique, biologique et de l'état écologique sur les mêmes sites d'étude.

Co-financements :

Les travaux proposés dans le cadre de cette action pourront bénéficier de projets plus larges tels que le Projet Interreg France-Wallonie-Flandres « Orion » (2024-2028), le projet GIP Seine Aval « Taranis » impliquant l'évaluation sur les biomarqueurs hématocytaires et de qualité spermatique.

4.2.3 Impact écologique de la saisonnalité des transferts de pesticides vers les cours d'eau : évaluation intégrée multi-échelles sur le bassin versant agricole drainé d'Orgeval

Cadre pluriannuel :

L'utilisation de pesticides en agriculture est reconnue comme un facteur important contribuant au déclin de la biodiversité (ESCO, INRAE 2022). La présence de drains enterrés dans les agrosystèmes constitue une voie de transfert facilitée et rapide des pesticides (et autres polluants d'origine agricole) vers l'hydrosystème. Ces transferts sont soumis à une forte saisonnalité liée aux pratiques agricoles et à l'hydrologie des bassins versants. Il est donc crucial de quantifier les conflits entre cette dynamique chimique et celle du vivant pour prévenir de graves altérations écologiques dans les cours d'eau impactés par l'agriculture, particulièrement dans un contexte de drainage intensif. Représentatif de bassins versants agricoles drainés du Bassin de la Seine (dont 30 % de la SAU est drainée), le bassin d'Orgeval (90 % de la SAU drainée) est un site-atelier faisant l'objet d'actions de recherche pluridisciplinaires depuis plusieurs décennies par le PIREN-Seine. Lors de phases précédentes, des fluctuations de concentrations en pesticides en lien avec le fonctionnement du drainage ont été mises en évidence à l'exutoire de ce bassin. En outre, des relevés ponctuels de macroinvertébrés effectués entre 2015 et 2020 ont mis en lumière des discontinuités écologiques sur le sous-bassin des Avenelles. Les flux de pesticides sont ainsi suspectés comme facteur de pression sur la biodiversité en place sur l'Orgeval.

L'action vise à évaluer l'impact écologique de la saisonnalité des transferts de pesticides vers les cours d'eau dans un contexte de bassin versant drainé à l'aide d'une approche intégrée multi-échelles. Il s'agira notamment de coupler différents descripteurs (hydrologiques, physiques, chimiques, écotoxicologiques et écologiques) sur des sous-bassins emboîtés de l'Orgeval à de larges échelles de temps et d'espace afin d'aboutir à une vision « EAU'listic » du risque environnemental lié aux pesticides dans le continuum sol-eau-biote. Un large panel d'indicateurs biologiques multi-niveaux sera déployé simultanément pour quantifier, en conditions réelles, l'impact des variations saisonnières de cette pression chimique sur la biodiversité aquatique à différents niveaux d'organisation (de la cellule aux communautés) et les fonctions écologiques associées. Ceci implique d'intégrer à la fois les facteurs naturels susceptibles d'influencer la réponse du vivant ainsi que d'autres pressions chimiques



potentielles (métaux, médicaments, antibiotiques...) afin de déterminer la part écotoxique inhérente aux pesticides. À terme, cette action permettra d'identifier des liens possibles entre fonctionnement du drainage, périodes d'exposition, impact des pesticides pour un diagnostic précoce de l'état de santé de la faune sauvage aquatique.

Les objectifs pluriannuels sont ainsi de :

- Caractériser la dynamique spatiotemporelle de la multi-contamination sur des cycles hydrologiques complets ;
- Évaluer l'état écologique des cours d'eau du bassin : dynamique des communautés, fonctions et vulnérabilités ;
- Évaluer la sensibilité des outils multi-niveaux et indicateurs globaux d'effets aux variations qualitatives et quantitatives de la multi-contamination d'origine agricole ;
- Identifier des périodes critiques d'exposition de la biodiversité : conflits entre dynamiques chimique et du vivant ;
- Établir des relations entre événements cellulaire et écosystémique traduisant des effets délétères en cascade ;
- Proposer des outils de diagnostic précoce des risques liés aux pesticides en milieu aquatique.

Pour répondre à ces objectifs, plusieurs suivis seront réalisés conjointement :

1. Suivis de paramètres physicochimiques et hydrologiques

Sur différents sous-bassins emboîtés de l'Orgeval, des stations seront instrumentées (dont 6 déjà instrumentées sur les Avenelles) pour suivre en continu différents paramètres nécessaires pour caractériser le support de vie des organismes (température, MES, conductivité, oxygène, COD, CIT...) et le fonctionnement hydrologique des cours d'eau agricoles (crues, drainage intensif...). Ce suivi permettra également d'identifier des facteurs naturels confondants susceptibles d'influencer la réponse du vivant.

2. Suivi chimique : écodynamique des pesticides

Les stations seront également équipées de préleveurs automatiques et de trappes à sédiments afin de quantifier les flux de pesticides dissous et particulaire sur des années hydrologiques complètes. Les analyses chimiques (> 300 pesticides et métabolites suivis dans les eaux composites) se feront à pas régulier de 2-3 semaines. Ce suivi permettra aussi d'évaluer les voies d'exposition des organismes selon leur mode de vie.

3. Suivi écotoxicologique : indicateurs précoces de toxicité

Le suivi écotoxicologique reposera sur des approches de biosurveillance active. En tant qu'espèces sentinelles, des gammars seront encagés sur les stations pour suivre les effets à l'échelle cellulaire (mesures de biomarqueurs impliqués dans la digestion, croissance, mue, stress oxydatif et neurotoxicité) et de la population (mesures de traits comportementaux : locomotion, reproduction, alimentation). La sensibilité de ces marqueurs biochimiques et comportementaux aux pesticides a déjà été montrée en milieu naturel à une échelle locale (c.-à-d., en zone humide construite pour collecter des eaux de drainage, Rampillon, 77). Aussi, les concentrations d'une vingtaine de pesticides bioaccumulés pourront être quantifiées dans les gammars pour de relier les expositions externe-interne et ainsi déterminer la fraction biodisponible et potentiellement toxique pour les organismes.

4. Suivi écologique : dynamique des communautés et vulnérabilités

Un suivi écologique est proposé afin d'avoir des réponses intégrées sur le long terme résultant d'expositions chroniques et répétées, contrairement aux biomarqueurs (sub-)individuels utilisés comme indicateurs précoces de toxicité. Ainsi, des sacs à litière seront déployés pour identifier les

impacts à l'échelle de la communauté. Les macroinvertébrés piégés dans les sacs seront caractérisés au travers d'indices globaux structurels et fonctionnels (ex. SPEAR basé sur des espèces sensibles aux pesticides) afin de déterminer la part inhérente aux pesticides au regard d'autres pressions chimiques ou physiques. De façon plus exhaustive, des prélèvements ponctuels, mais normalisés de l'ensemble des communautés d'invertébrés (I2M2) seront réalisés pour caractériser la dynamique pluriannuelle des structures et fonctions de l'ensemble des communautés indigènes. À l'échelle de l'écosystème, le taux de dégradation de la litière, en tant que fonction écosystémique, sera suivi pour identifier des impacts globaux.

Programme 2025 – 2026 :

En 2025, l'ensemble de ces suivis multiparamétriques seront réalisés en continu sur le sous-bassin des Avenelles sur une année hydrologique complète pour une caractérisation précise des dynamiques chimique et biologique.

En 2026, ces suivis se poursuivront sur les Avenelles en ciblant notamment des périodes critiques d'exposition afin d'intégrer les variations interannuelles de la multi-contamination liée aux pratiques agricoles.

Cette action sera complémentaire des actions A4B1.1 et A4B1.2, et de l'action CFluxes de l'Axe 5.

Co-financements :

Cette action bénéficiera de l'appui de la thèse de Léo Persat (INRAE) dont l'acquisition de données physicochimiques et écotoxicologiques sur les années 2023 et 2024 pourront alimenter l'action, ainsi que des appuis financiers acquis pour instrumentation des stations du sous-bassin des Avenelles et les suivis continus de paramètres hydrologiques et physicochimiques (OZCAR).

4.2.4 Multicontaminations et Impacts en contexte Péri-Urbain : le bassin versant de l'Orge comme site modèle

Cadre pluriannuel :

L'action proposée vise à poursuivre le suivi de plusieurs contaminants (« cocktail ») historiques (éléments traces métalliques, HAP) et émergents (produits pharmaceutiques, certains métalloïdes comme Sb) dans le bassin versant de l'Orge, sous-bassin périurbain de la Seine, et à déterminer leur impact sur le biote grâce à des indicateurs macroinvertébrés aquatiques. Pour cela, les teneurs en éléments traces, HAP, certains pesticides et produits pharmaceutiques seront déterminées dans les phases dissoutes et particulaires, au niveau de 4 sites suivis de façon discontinue depuis 2001, en périodes de basses, moyennes et hautes eaux, notamment dans le cadre des phases précédentes du PIREN. Les sites localisés en amont du bassin versant et en aval seront mutualisés avec d'autres actions sur l'Orge (4.2.6 et 4.3.2), les sites d'Egly et sur l'Yvette restant spécifiques à cette action. Sur ces mêmes sites, la diversité et l'abondance locale des macroinvertébrés aquatiques, indicateurs de perturbations, seront déterminées et analysées pour en déduire des indices écologiques et l'impact de l'urbanisation, en basses eaux (sortie d'été) et hautes eaux (printemps) pendant deux années.

Le bassin versant de l'Orge, sous-bassin versant de la Seine, inclue une partie du « plateau de Saclay », zone en profonde mutation depuis 2010 avec la construction du campus universitaire et une forte croissance démographique. Le bassin versant de l'Orge est caractérisé par un mode d'occupation des sols très contrasté, avec une dominance de forêts et de terres agricoles en amont et une zone densément peuplée en aval. En outre, plusieurs zones humides sont présentes dans le bassin versant, soit le long de l'Orge et de ses affluents, soit sur le plateau de Saclay. Ce site d'étude en contexte



périurbain est donc représentatif de la plupart des conditions rencontrées dans les régions tempérées de basse altitude en Europe. Dans ce bassin versant, les concentrations d'ETM urbains (Pb, Zn, Cu et Sb) ainsi qu'en HAP augmentent considérablement dans les charges dissoutes et particulaires le long du gradient d'urbanisation (Le Pape et al., 2012, Froger et al., 2018 et 2019).

Le caractère innovant de l'action est de combiner, dans une démarche intégrative dans le temps (plusieurs saisons et sur deux années) comme dans l'espace (4 sites de l'amont à l'aval du bassin versant), et interdisciplinaire, une approche sources-puits, multi-traceurs et multi-compartiments pour retracer la contamination du bassin versant de l'Orge et son impact sur le milieu, en contexte périurbain, et donc intrinsèquement sous forte pression anthropique.

Les résultats obtenus apporteront des éléments de prospective quant à la multi-contamination d'un bassin versant « modèle » perturbé, en caractérisant finement l'évolution spatiotemporelle d'un cocktail de contaminants, et la réponse adaptative des macroinvertébrés aquatiques, parmi lesquels certaines espèces sentinelles. Les flux de contaminants exportés vers la rivière seront quantifiés et l'impact du changement d'occupation des sols identifié.

Programme 2025 – 2026 :

L'action proposée repose sur un suivi chimique pluriannuel à l'échelle du bassin versant de l'Orge, qui peut être considéré comme un site atelier périurbain pertinent, ainsi qu'à une étude des impacts sur le biote, avec les macroinvertébrés aquatiques comme population modèle.

Le suivi chimique (éléments en traces métalliques, HAP, pesticides, produits pharmaceutiques) reposera sur des échantillons prélevés sur certains sites étudiés par Froger et al. (2018, 2019, 2020) et Colin et al. (2021) : trois sites sur l'Orge, et un sur l'Yvette. Deux types d'échantillonnage seront réalisés dans la rivière : des échantillons ponctuels de l'eau de la rivière (env. 10L), y compris les phases dissoutes et particulaires, et des échantillons intégratifs de particules en suspension, collectés pendant 3 à 5 jours à l'aide de pièges à sédiments. Le choix des procédures d'échantillonnage a été guidé par l'exigence d'une quantité significative de matériel (plusieurs grammes) pour effectuer des mesures de radionucléides sur les MES, difficilement réalisables par la filtration de 10 L d'eau de la rivière et justifié par la représentativité du matériel sédimentaire collecté dans les pièges. Ces mesures renseigneront sur l'origine (surface vs profondeur) et le temps de résidence dans le bassin versant (Froger et al., 2018).

Ces échantillons seront prélevés quatre fois par an, en périodes de basses/moyennes et hautes eaux, en 2025 et 2026. Si une crue a lieu, tout sera mis en œuvre pour la documenter le plus précisément possible (comme Le Gall et al., 2018). Lors de chaque prélèvement, les paramètres physicochimiques (pH, EC, T°, demande en O₂) seront mesurés. Selon la possibilité sur site, des préleveurs passifs type DGT seront déployés dans l'Yvette et l'Orge pour compléter à plus haute résolution l'évolution de la qualité de l'eau et intégrer une plus grande dimension temporelle.

Les données physicochimiques, ainsi que les teneurs en cations et anions majeurs, et traces dans les compartiments dissous/particulaire/sédiment de fond seront partagées avec les différentes actions sur l'Orge.

Une carotte ou un échantillon intégratif sera prélevé dans le bassin de rétention de la N118 en aval hydraulique du Plateau de Saclay pour discriminer l'impact de l'augmentation de l'activité anthropique, c.-à-d. routes et habitats, sur le plateau. Enfin, des eaux de pluie seront collectées pendant une année hydrologique entière sur différents sites (un site urbain, un site agricole) pour documenter la variabilité spatiale des retombées atmosphériques et déterminer les apports atmosphériques.

Les macroinvertébrés aquatiques seront collectés dans différents habitats de l'Orge et l'Yvette, aux mêmes points de suivi de la contamination, en basses eaux (sortie d'été) et hautes eaux (début du printemps). Ils seront ensuite identifiés et comptés, afin d'explorer leur diversité spatiotemporelle et

de comprendre les effets des contaminants sur l'abondance et la structure de la communauté (Hulot et al., en révision). La diversité des communautés d'invertébrés sera explorée par le calcul de la richesse des morphotaxons (diversité alpha), l'indice de diversité de Shannon et la régularité pour chaque site de prélèvement et chaque campagne de terrain avec la fonction specnumber de vegan 2.5-6. L'effet de chaque site et de chaque campagne de terrain sur ces paramètres sera testé avec une analyse de variance suivie d'une comparaison par paire.

4.2.5 Contribution des parasites dans la dynamique des polluants et conséquences écotoxicologiques

Cadre pluriannuel :

La contamination des écosystèmes aquatiques par les pesticides et les résidus de médicaments peut affecter les interactions biotiques. Les parasites sont rarement pris en compte dans les études d'écotoxicologie et de chimie des contaminants, malgré l'omniprésence de cette relation durable parmi les organismes. Ainsi, l'étude du devenir des polluants dans les écosystèmes aquatiques se focalise généralement sur les transferts des proies aux prédateurs, sans y inclure les transferts des hôtes aux parasites. Or, nos travaux, menés depuis 2016 (financés par l'AESN, l'ITE-SU, l'ANR) montrent que des parasites intestinaux, les acanthocéphales, présentent la remarquable capacité d'accumuler divers polluants, tels que les phtalates et les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) depuis leur poisson-hôte, les chevesnes *Squalius cephalus*. Ces travaux confirment de précédents résultats sur les éléments traces métalliques : les niveaux en plomb sont jusqu'à 2700 fois supérieurs dans les parasites que dans les chevesnes, au point que les poissons parasités sont moins contaminés que les poissons non parasités.

Cette séquestration de contaminants par les parasites pourrait alors présenter des avantages pour les hôtes. Nos précédents résultats ont permis de mettre en évidence le fait que le stress oxydant, induit par l'exposition aux HAP, est réduit chez les poissons infestés par les acanthocéphales. Toutefois, la présence de parasites altère la composition et la diversité du microbiote intestinal des poissons, ce qui pourrait provoquer des dysbioses. La pollution environnementale pourrait faire basculer une relation de parasitisme vers du mutualisme, si les coûts de la relation parasitaire sont contrebalancés par le bénéfice de l'accumulation des polluants. Pour tester cette hypothèse, nous proposons d'étudier des chevesnes en milieux naturels, ainsi qu'en milieu semi-naturel (mésocosmes extérieurs de 12 000 litres au CEREAP Ecotron), afin d'évaluer les conséquences des interactions entre parasitisme et pollution à différentes échelles biologiques.

Les pesticides et les résidus pharmaceutiques sont des substances biologiquement actives, qui peuvent perturber les relations entre le poisson-hôte, son microbiote intestinal et les parasites intestinaux. Nous proposons d'explorer le devenir et les effets des pesticides et résidus pharmaceutiques sur les relations hôtes-parasites.

Cette action PIREN-Seine vise à :

- (1) Caractériser les dynamiques de transferts des pesticides et des résidus pharmaceutiques entre les hôtes (poissons, chevesnes) et leurs parasites (acanthocéphales) et de les comparer aux transferts d'éléments traces métalliques. Ce premier objectif répond au bloc 1 de l'axe 4, en prenant en compte les relations hôtes-parasites dans la compréhension de l'écodynamique de ces polluants.
- (2) étudier les effets croisés du parasitisme et de l'exposition aux polluants (imidaclopride, diclofénac, paracétamol, S-métolachlore, seul ou en mélange) chez les chevesnes, au travers de différentes approches biologiques (stress oxydant, stress physiologique, neurotoxicité, comportement, coloration, condition corporelle)



- (3) Étudier les effets croisés du parasitisme et de l'exposition aux pesticides et médicaments sur la composition et la diversité du microbiote intestinal des poissons.
- (4) étudier les conséquences de cette accumulation de polluants sur la valeur sélective des parasites acanthocéphales (croissance, reproduction).

Programme 2025 – 2026 :

Les deux premières années seront consacrées à la collecte et à l'analyse des échantillons sur le terrain et en mésocosmes au CEREEP-Ecotron Île-de-France (CNRS UMS 3194, Saint-Pierre-lès-Nemours). Sur le terrain, les sites d'étude (affluents de la Seine, au sud de l'Essonne et sud de la Seine-et-Marne, à <60 km du CEREEP Ecotron pour le transport de poissons, en partenariat avec les fédérations de pêche et de protection du milieu aquatique 91 et 77, et des syndicats de rivière) des prélèvements d'eau seront systématiquement réalisés pour caractériser les niveaux de contamination lors des pêches. En mésocosmes, les chevesnes seront exposés pendant plusieurs mois à des pesticides et résidus de médicament, seul ou en mélange, de façon chronique ou aiguë, à des doses environnementales réalistes.

Une cinquantaine de pesticides (herbicides, insecticides, fongicides) et résidus de médicaments, ainsi que les éléments trace métalliques seront analysés dans l'eau et dans les tissus des chevesnes et des acanthocéphales (directement après capture sur le terrain ou après exposition en mésocosme), par LC-MSMS (chromatographie liquide couplée à des spectromètres de masse en tandem). En fin d'exposition chronique ou aiguë, des tests comportementaux seront réalisés sur les individus dans des bacs individuels, les réponses étant enregistrées par caméra et analysées grâce au logiciel ToxTrac. Des prélèvements sanguins seront réalisés pour les analyses de différents marqueurs moléculaires et physiologiques (stress oxydant, ratio neutrophile/lymphocyte, acétylcholinestérase), et la diversité ainsi que la composition du microbiote intestinal seront évaluées par séquençage haut débit de l'ARN ribosomal 16S. Le nombre de parasites acanthocéphales présents dans l'intestin des chevesnes, ainsi que leur développement (taille et biomasse) et la quantité d'œufs par femelle (évaluée au microscope) seront suivis pour tester un effet de l'exposition aux polluants sur la valeur sélective des parasites.

Co-financements :

Cette action sera complémentaire au projet ANR JJC HELP « Helpful parasites in polluted environments » qui finance le postdoctorat de Léa Lorrain-Soligon. Une thèse devrait débuter en octobre 2024 à la suite de l'obtention d'une bourse doctorale.

4.2.6 Antibiorésistance en milieu aquatique urbanisé : contribution des gastéropodes aquatiques

Cadre pluriannuel :

Durant la précédente phase du PIREN-Seine, avec un co-financement par la MITI-CNRS (Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires), nous nous sommes intéressés au rôle de l'ichtyofaune comme vecteur de dissémination de bactéries antibiorésistantes dans l'environnement. Ces travaux complétaient les études précédemment menées, visant à étudier la contamination diffuse de l'environnement (eaux, sédiments, biofilm) par des antibiotiques et par des bactéries antibiorésistantes.

Par des approches descriptives et expérimentales, nous avons étudié les marqueurs d'antibiorésistance dans le microbiote intestinal et cutané de plusieurs espèces de poissons dans une rivière urbanisée, l'Orge, et les niveaux de contamination par les antibiotiques et pesticides (des

contaminants susceptibles de favoriser une co-sélection de bactéries antibiorésistantes) de ces mêmes poissons. Ainsi les travaux menés lors de la précédente phase du programme ont montré que les poissons de l'Orge hébergeaient au sein de leur microbiote des *Enterobacterales*, dont certaines espèces résistantes aux antibiotiques étaient aussi retrouvées dans le microbiote digestif des humains. Nous avons ensuite exploré la dynamique de ces contaminants chimiques et biologiques le long d'un réseau trophique. Il s'est avéré qu'un groupe taxonomique, les gastéropodes pulmonés aquatiques (p. ex. limnées, myxas, planorbes), se distinguait avec des niveaux particulièrement élevés d'antibiotiques (ciprofloxacine, jusqu'à 72 ng/g poids sec, acide oxolinique, <40 ng/g ps) et de pesticides (diflufenican, jusqu'à 816 ng/g ps, tebuconazole <20 ng/g poids sec) ainsi que le portage d'*Enterobacterales* dans les microbiotes des limnées. Ce dernier aspect est novateur, car il n'a jamais été décrit l'existence de telles bactéries au sein du microbiote des gastéropodes. Le portage de bactéries antibiorésistantes par la faune sauvage s'explique par la proximité des individus aux zones urbanisées (Vittecoq et al. 2023). Nous avons constaté que les valeurs de contamination des gastéropodes par les antibiotiques et pesticides étaient extrêmement variables entre échantillons et en fonction des périodes d'échantillonnage, avec des valeurs plus élevées en novembre 2021, qu'en avril 2022. Cela laisse suggérer une variabilité temporelle en lien avec la contamination biologique et chimique du milieu.

Il est important de noter que les limnées (*Lymnaea stagnalis*) sont considérées comme une espèce modèle en écotoxicologie en raison de leur fort potentiel à bioaccumuler des polluants métalliques et organiques. Il apparaît donc pertinent de mener une action spécifique sur les mollusques gastéropodes pulmonés aquatiques, qui restent peu étudiés dans le contexte de l'antibiorésistance en milieu aquatique.

Programme 2025 – 2026 :

Il s'agira de collecter des gastéropodes (limnées et planorbes) sur un site d'étude (l'Orge à Viry-Châtillon) puis de réaliser les analyses chimiques et microbiologiques sur les tissus mous pour décrire les variations de contamination par des antibiotiques, pesticides et par des bactéries antibiorésistantes. Les spécimens collectés seront identifiés, mesurés, pesés. Des échantillons d'eau et de sédiments seront également collectés et analysés à chaque prélèvement de gastéropodes pour connaître l'évolution de la contamination microbiologique et chimique dans le milieu.

Au vu des espèces bactériennes résistantes aux antibiotiques isolées sur les poissons de l'Orge (Vivant et al., 2024), et les résultats préliminaires obtenus sur les gastéropodes, il est prévu de focaliser sur des espèces bactériennes appartenant aux *Enterobacterales*, présentes à la fois chez les gastéropodes et au sein du microbiote digestif des humains. Une approche culturomique permettra d'isoler des *Enterobacterales* mésophiles sur milieux sélectifs, qui seront identifiées par spectrométrie de masse (MALDI-TOF MS, Bruker Daltonics, Germany). Une caractérisation des profils phénotypiques d'antibiorésistance sera réalisée selon la méthode préconisée par le comité de la SFM (Eucast, 2019) complétée par la caractérisation génotypique à partir des biopuces permettant la détection simultanée de 94 gènes de résistance d'intérêt en milieu clinique (plateforme OSUR).

Il est prévu de réaliser quatre campagnes pour l'analyse de l'eau, des sédiments et des gastéropodes : deux en période basse eaux, deux en période de hautes eaux dont une en période épidémiologique, période pendant laquelle les prescriptions en antibiotiques sont les plus élevées.

Cette action est en lien avec d'autres actions « Rôle de l'interaction bactéries – amibes au sein des biofilms dans l'émergence de bactéries pathogènes et de l'antibiorésistance » (A4.B3.2) et avec l'action « Multicontaminations et impacts en contexte périurbain : le bassin versant de l'Orge comme site modèle » (A4.B2.4). Notre site (l'Orge à Viry-Châtillon, au parc Duparchy) est mutualisé avec ces deux actions, et les campagnes seront donc communes sur ce site. Nous effectuerons les analyses de polluants organiques (HAP, pesticides, résidus de médicaments dont les antibiotiques) dans l'eau (phase dissoute, et phase particulaire pour les HAP) et dans les sédiments et mutualiserons les données acquises. Les analyses de métaux seront effectuées par l'action A4.B2.4. Nous pourrons comparer les



résultats de la contamination par les polluants organiques et les marqueurs d'antibiorésistance entre le biofilm et les gastéropodes collectés sur ce site, grâce aux travaux de l'action A4.B3.2.

Co-financements :

Cette étude s'inscrit dans le projet de doctorat de Benjamin Janvier. Pour le volet microbiologie/biologie moléculaire, il est envisagé de déposer une demande à EC2CO (Dycovi).

BLOC 4.3. Part de l'eau dans l'exposome et rétroactions anthropogéniques

Les êtres humains, par leurs activités de production et de consommation, sont les principaux contributeurs à l'exposome auquel ils sont soumis. L'eau est souvent perçue comme un proxy de cette multi-exposition. Néanmoins, la représentativité de ce proxy au regard d'autres compartiments reste à définir. Les objectifs sont donc d'établir la part de l'eau dans l'exposome et les risques associés pour la santé et, de quantifier les effets bénéfiques de rétroactions passées ou à promouvoir. Les analyses rétrospectives basées sur des données antérieures du PIREN-Seine sont aussi un atout pour anticiper les effets et les risques associés sur le temps long.

L'eau est considérée comme réceptacle final et vecteur de contamination. D'une part, il s'agit de caractériser la signature de son empreinte chimique en fonction de l'occupation du sol (urbain et/ou agricole), des sources et de pratiques de l'échelle individuelle (ménages) à celle collective (territoire). Dans un contexte d'exposome, il est nécessaire d'évaluer l'importance de l'eau au regard d'autres voies d'exposition (nourriture, air...) pour l'homme. D'autre part, parmi les risques environnementaux et sanitaires liés aux contaminants véhiculés par l'eau, ce bloc s'intéresse également à la contamination microbienne, à la dissémination de l'antibiorésistance et/ou à sa régulation naturelle au sein de l'environnement aquatique.

Différents postes d'action en amont (écocompatibilité de substances de remplacement, solutions techniques à la source...), changements d'habitude et de pratiques (Zéro'Phyto en zone urbaine) sont des rétroactions destinées à limiter les flux de contaminants chimiques et biologiques vers l'hydrosphère. En s'appuyant sur des données antérieures, de sites de référence ou historiques de contamination, la quantification d'effets bénéfiques de rétroactions sur le temps long fournira des éléments d'appui pour sensibiliser et promouvoir des changements de pratiques individuelles et des actions collectives. Ainsi, les actions du bloc 1 s'appuyant sur des suivis long-terme ou les archives sédimentaires (A4B1.1 et A4B1.4.) se complètent aux enjeux de ce bloc 3.

Ce bloc comprend 2 actions pour un budget prévisionnel de 44,2 k€ pour l'ensemble de la phase 9.

4.3.1 La contamination en micropolluants des particules atmosphériques : impacts sur la contamination des retombées atmosphériques et impacts sanitaires

Cadre pluriannuel :

Les retombées atmosphériques jouent un rôle prépondérant dans le transport et le dépôt de micropolluants organiques depuis les zones d'émission (urbaines) jusqu'aux têtes de bassins versants, contribuant ainsi leur dispersion dans les écosystèmes. La contamination des retombées atmosphériques peut s'effectuer par des échanges entre les micropolluants sous forme gazeuse et les

retombées, mais aussi par l'incorporation de particules atmosphériques contaminée au sein de ces retombées. Si le transfert des polluants entre les phases gazeuse/liquide est bien connu, les processus menant à la contamination des retombées via les particules restent à mieux cerner. Dans la précédente phase du PIREN, nous avons montré que la contamination des particules atmosphériques n'était pas homogène sur l'ensemble des classes de particules, et que les micropolluants étaient principalement associés aux particules, les plus fines, c'est-à-dire avec un diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm. Néanmoins le lien entre cette répartition et la contamination des retombées atmosphériques doit encore être approfondi. De plus, cette répartition interroge aussi sur l'impact sanitaire potentiel de ces particules puisque ce sont les particules, qui peuvent s'infiltrer le plus profondément dans l'arbre respiratoire, qui portent la charge chimique la plus importante.

Les objectifs de cette action seront donc d'approfondir la compréhension du rôle de ces particules dans la contamination des retombées atmosphériques, mais aussi de contribuer aux connaissances sur l'impact sanitaire de ces particules et sur la part de ces particules et de la contamination de l'air dans l'exposome.

Cette action sera en lien avec d'autres actions :

- Minéralogie urbaine (Axe 2) : prélèvements de particules atmosphériques pour analyses conjointes minéralogie/métaux/polluants
- Suivi long terme de la contamination par les pesticides (et les antibiotiques) dans le ru des Avenelles (A4B1.1) : suivi des pesticides dans l'air et parts respectives de l'air et de l'eau dans l'exposome

Cette action sera aussi en lien avec deux projets :

- Projet Ecorc'Air : cartographie de l'exposition en particules métalliques par des mesures sur les écorces de platane, comparaison du signal magnétique, métallique et en HAP
- Projet ANSES Ricotta : approches chimiques et toxicologiques pour caractériser les particules fines

Programme 2025 – 2026 :

Cette action s'appuiera en 2025 sur des campagnes de prélèvements réalisées dans le cadre du projet Ricotta financé par l'ANSES. En complément de ces prélèvements, nous prévoyons de collecter les retombées atmosphériques afin de pouvoir comparer les concentrations en micropolluants sur les PM1 et PM2.5 et celles des retombées sur le site urbain (Pa13), site suivi lors des précédentes phases du PIREN.

À partir de 2025, des prélèvements supplémentaires de particules atmosphériques seront aussi réalisés en lien avec l'action « minéralogie urbaine » (Axe 2) et en lien avec le projet Ecorc'Air afin de comparer les contaminations en métaux et micropolluants organiques portés par les particules.

En 2026 et 2027, des campagnes de prélèvements (air, particules, retombées) seront effectuées sur le site de Boissy-le-Châtel et de Paris afin de continuer le suivi à long terme de la contamination de l'atmosphère de ces deux sites (4 saisons). Des analyses de pesticides seront également réalisées afin de déterminer les parts de l'exposition aux polluants par l'air et par l'eau dans l'exposome. L'exposition par l'ingestion des aliments sera évaluée en se basant sur l'étude INCA 3 et EAT de l'ANSES. Cette partie sera en lien avec l'action A4B1.1.

Cette action bénéficiera aussi des résultats du projet Ricotta pour l'évaluation des potentiels toxicologiques des particules atmosphériques



Co-financements :

Cette action bénéficiera du soutien logistique lors du projet ANSES Ricotta « Charge toxique des particules fines urbaines selon leur classe et contamination en composés perturbateurs endocriniens : approches combinées pour identifier un indicateur de qualité sanitaire de l'air », ainsi que de la collaboration avec le projet de sciences participatives « Ecorc'Air » et de la thèse de Nour Daaboul, « Traçage des particules fines aériennes : lien entre les conditions de l'environnement urbain et l'impact sur la santé humaine.

4.3.2 Rôle de l'Interaction Bactéries – Amibes au sein des Biofilms dans l'Émergence de bactéries pathogènes et de l'antibiorésistance

Cadre pluriannuel :

Afin de déterminer l'implication potentielle de l'environnement aquatique à favoriser la dissémination de l'antibiorésistance, des travaux se sont intéressés aux biofilms qui fixent et accumulent des antibiotiques dans leurs structures (Huerta et al., 2016 ; Aubertreau et al., 2017). Ces biofilms pourraient constituer des réservoirs potentiels de bactéries résistantes et de gènes de résistance aux antibiotiques. Le bassin versant de l'Orge, affluent qui se jette dans la Seine à l'amont de Paris, est intéressant, car il subit une pression agricole en amont et une pression urbaine marquée à l'aval. Il a fait l'objet de nombreuses études de suivi de la contamination et des effets associés sur l'écosystème aquatique (Botta et al., 2009, Marchand et al., 2024). Il a particulièrement fait l'objet d'une étude sur la dissémination de l'antibiorésistance (en lien avec les antibiotiques présents dans le milieu) dans le cadre des projets PANDORE (ANSES) et PIREN-Seine phase 8 (Dinh et al., 2017a & 2017b). Au sein des biofilms, les fluoroquinolones ont été majoritairement détectées avec un gradient de quantité de la source vers la confluence à des concentrations qui restent toutefois sub-inhibitrices. En parallèle, des indicateurs de résistances (intégrons de résistances, et/ou *E. coli* BLSE, ainsi qu'une sélection de gènes de résistance) ont été recherchés en fonction de l'anthropisation des milieux. Les résultats montrent que les *E. coli* et intégrons cliniques peuvent s'accumuler dans les biofilms en réponse à un événement pluvieux extrême sans toutefois s'accumuler au cours du temps. Par ailleurs, il n'a pas été montré de concordance entre les contaminants présents dans le cours d'eau (phase dissoute) et la teneur mesurée dans les biofilms. La distinction entre ces deux compartiments est surtout liée à la polarité des substances. Afin d'avoir une meilleure comparaison de ce qui est apporté par l'Orge et les teneurs dans le biofilm, l'analyse des matières en suspension sera réalisée pendant le temps de développement des biofilms.

Dans l'environnement, les bactéries sont en interaction avec des organismes, dont des microorganismes eucaryotes comme les amibes libres, se nourrissant de bactéries qu'elles digèrent par phagocytose (Rodriguez-Zaragoza, 1994). Cependant certaines bactéries dont des pathogènes comme *Pseudomonas aeruginosa* ou *Stenotrophomonas maltophilia* sont capables de résister à la lyse et expriment un phénotype de multirésistance (Denet et al., 2017 ; Denet et al., 2018).

Cette action vise à évaluer le rôle du compartiment microbien amibien, connu pour son rôle écologique de régulateur des populations bactériennes, mais dont les fonctions de réservoirs, de vecteur et de potentialisation des propriétés des bactéries dans une niche comme le biofilm n'ont pas été explorées. Les objectifs de cette action sont (i) d'appréhender le rôle des interactions bactéries – amibes au sein de biofilms dans l'émergence de bactéries pathogènes et (ii) de déterminer si les interactions au sein de ces niches sont à l'origine de la dissémination de l'antibiorésistance.

Programme 2025 – 2026 :

En utilisant des pièges à biofilm développés dans le cadre de la phase 8 du PIREN-Seine, nous proposons de suivre le flux de bactéries pathogènes associées au compartiment « amibe » au sein de biofilms. Il est prévu de réaliser 4 campagnes : 2 campagnes seraient réalisées en période de basses eaux avec des biofilms de maturité différente (1 mois et 4 mois) ainsi que deux autres campagnes en période de hautes eaux. Les quatre campagnes seraient réalisées au cours d'une période où les prescriptions en antibiotiques sont les plus élevées (automne - hiver). Les biofilms seraient de plus prélevés le long d'un gradient d'urbanisation dans le bassin de l'Orge (3 points). Des prélèvements seront également réalisés dans l'Orge pour l'analyse différenciée des phases dissoute et particulaire.

Au sein de chaque biofilm aquatique, nous caractériserons la composante biotique (amibes, bactéries) par des approches culturales et moléculaires, ainsi que les contaminants chimiques susceptibles d'apporter une pression de sélection (c.-à-d. substances médicamenteuses dont antibiotiques, métaux, biocides, pesticides). L'analyse des propriétés d'antibiorésistance (phénotypes et gènes spécifiques comme *bla*, *qnr*...) et la recherche de gènes de fonction généraliste (exemple de pompes à efflux dont l'expression a été montrée comme augmentée dans les amibes ; Denet et al., 2020) de *Stenotrophomonas maltophilia* (espèce environnementale, responsable d'infections associées aux soins) en parallèle à l'indicateur de contamination fécale *Escherichia coli* permettra de caractériser l'exposome biotique. Les profils phénotypiques d'antibiorésistance seront réalisés selon les méthodes préconisées par le comité de la SFM (Eucast, 2019).

Cette action est en lien avec l'action A4B2.6. Pour ces deux actions, le site de Viry-Châtillon est commun et nous bénéficierons des analyses de polluants organiques réalisés dans l'eau et les sédiments. Il sera alors possible d'évaluer le rôle de la contamination sur l'occurrence de marqueurs de l'antibiorésistance à la fois dans les biofilms (composante amibe) et les gastéropodes.

4.3.3 Suivi des *E. coli* et des risques de contamination fécale dans les eaux

Cadre pluriannuel :

L'objectif de l'action est de capitaliser sur les projets développés au sein du PIREN-Seine en phase 8 et d'intégrer les travaux d'équipes partenaires qui se sont déroulés dans d'autres contextes afin d'être capable de diffuser une information cohérente auprès des différents partenaires opérationnels.

Ces travaux concernent notamment l'évaluation de méthodes de prévision des teneurs en *E. coli* par des méthodes statistiques utilisant des données hydrométéorologiques en général antérieures et d'autres données de qualité qui soit spécifiques à la mesure des *E. coli* ou non spécifiques. Ces méthodes ont en commun l'utilisation d'outils statistiques de prédiction. Dans ce domaine, l'action proposée est d'organiser un atelier de discussion sur ces méthodes qui permettra de partager les méthodes de validation utilisées, et de proposer une vision cohérente de leurs performances et de leur pertinence dans différentes circonstances.

Il semble également nécessaire, tant les différents rejets interagissent entre eux, de développer une application qui couvre l'ensemble de l'agglomération parisienne, éventuellement jusqu'à l'estuaire. En particulier, le modèle ProSe-BIF pourrait être assez facilement transposé à cette échelle, de nombreux éléments étant déjà disponibles, mais un travail de mise en ordre des données d'apport en particulier est nécessaire. Ce travail nécessitera une implication significative des partenaires du programme. Par ailleurs des applications plus locales bidimensionnelles ont été développées pour préparer les futurs plans de baignade, une réflexion sur les connexions entre tous ces modèles pourrait être engagée.

Enfin, il reste essentiel de pouvoir exprimer les résultats de simulation en termes de risque. Bien que les règles qui prévalent pour le classement des sites de baignade se basent sur des séries de données de concentrations de *E. coli*, la notion de risque et sa quantification restent essentielles. En particulier,



les décisions de fermeture temporaire et réouverture devraient être prises sur la base d'une évaluation des risques. Or, nous n'avons que peu d'éléments en ce domaine et nous proposons donc une réflexion sur les méthodes d'estimation des risques qui pourraient être mises en œuvre sur la base des résultats de modélisation et des données y compris éventuellement l'utilisation d'approches de type QMRA (*Quantitative Microbial Risk Assessment*).

Programme 2025 – 2026 :

La mise en œuvre de la première partie de ce projet se déroulera sous forme d'un atelier avec *a priori* 4 séminaires d'échange organisés sur 2 ans pour aboutir à un document de synthèse. Le cas échéant, un stage de master pourra être nécessaire pour finaliser la synthèse. Ce fonctionnement sous forme de séminaires sera aussi une occasion d'inviter des experts extérieurs au programme.

La constitution d'un modèle à l'échelle de l'agglomération parisienne et jusqu'à Poses nécessitera un important travail de collecte de données pour la mise en place du modèle (validation de la géométrie, évaluation des apports) et pour sa validation (organisation de campagnes de mesure le long de l'axe Seine en plus de l'existant). Le modèle à cette échelle devrait pouvoir être implémenté et validé au travers des campagnes de mesures prévues à une échelle de deux années. Un groupe de travail constitué des partenaires impliqués devra être constitué et des ressources humaines (stagiaires) spécifiques affectées à cette partie du projet.

Enfin, le point sur l'intégration explicite du risque serait traité également sous forme de séminaires, d'une fréquence encore à définir, soit 2 à 4 par an.

5. Axe 5 : Transferts biogéochimiques le long du continuum Homme-Terre-Mer sous changements socioclimatiques

L'appréhension territoriale des continuums Homme-Terre-Mer (HTM) est rendue complexe par la diversité et la singularité des socio-écosystèmes qui s'interconnectent dans le temps et dans l'espace. Dans le programme PIREN-Seine, cette appréhension du continuum HTM s'est opérée de façon composite autour de compartiments emblématiques ou d'interfaces clés au sein de la zone critique, via la modélisation en lien direct avec l'expérimentation, les mesures de terrain, et avec des granularités spatiotemporelles différentes. Depuis plus de 30 ans, ces recherches fondamentales ont permis un assemblage de modèles construits avec une démarche d'amélioration continue. Ces outils se positionnent aujourd'hui de façon opérationnelle comme support exploratoire au service de la prospective territoriale, prospective qui s'attachera plus particulièrement durant cette phase à évaluer l'impact d'une modification des régimes hydrologique et thermique sous climat changeant sur les différents compartiments du continuum HTM ainsi que ses interfaces (zone non saturée, échanges nappe-rivière).

Le carbone (C) et les éléments nutritifs ont historiquement structuré l'étude du continuum dans le programme PIREN-Seine, permettant de mieux comprendre le fonctionnement écologique du bassin de la Seine, tout en répondant à des questions sanitaires et opérationnelles de première importance pour les partenaires. Une poursuite de ces recherches sera réalisée pour anticiper l'évolution de ce fonctionnement sous des changements anthropiques, hydrologiques et thermiques, notamment les développements phytoplanctoniques, les dynamiques du carbone et de la matière organique (MO sous différentes formes et niveaux de biodégradabilité), l'évasion de dioxyde de carbone (CO₂) et la production de méthane (CH₄) en lien avec les métabolismes aquatique et terrestre. Au cours de cette nouvelle phase, la chaîne de modélisation Homme-Terre-Mer (présentée en phase 8), les mesures de terrain haute fréquence et les mesures hydro-géophysiques seront structurantes pour simuler de nouveaux processus biogéochimiques dans les différents compartiments du socio-écosystème, notamment à travers la poursuite des développements sur la modélisation des pesticides.

En lien étroit avec les travaux des autres axes du programme, l'enjeu de l'axe 5 est de comprendre comment les dynamiques des éléments nutritifs, de la matière organique et des contaminants du bassin vont évoluer avec de nouvelles pratiques anthropiques, des changements globaux conduisant à des modifications hydrologiques et thermiques. Pour cela, plusieurs outils et avancées conceptuelles sont envisagés.

BLOC 5.1. Fonctionnement thermique et biogéochimique des milieux aquatiques : modélisation et apports des données satellitaires

Les outils de la chaîne de modélisation Homme-Terre-Mer seront mobilisés dans ce premier bloc d'actions avec une attention particulière qui concerne les impacts potentiels du réchauffement des eaux de surfaces, l'altération de leur fonctionnement biogéochimique et leur résilience dans un contexte de changement climatique.

Une poursuite des développements méthodologiques sera requise pour mieux représenter la stratification thermique des milieux stagnants, analyser la sensibilité des processus aquatiques à une modification des températures (en intensité, en amplitude et en saisonnalité), ou encore pour intégrer des simulations de flux de chaleurs (qui seront développés dans l'axe 1) en Seine à la traversée de Paris (Prose-PA), ainsi que sur l'ensemble du chevelu hydrographique (pyNuts-Riverstrahler).



Par ailleurs, les actions du bloc 1 s'attacheront également à évaluer le potentiel de nouvelles techniques/technologies telles que les chaînes de traitement « couleurs des eaux continentales » (basée sur les images satellites Sentinel 2) en complément de la surveillance des milieux aquatiques, ou encore les réseaux de neurones (*machine learning*) pour pallier les lacunes des réseaux de mesure de températures.

5.1.1 Quels effets des augmentations de la température sur le fonctionnement biogéochimique des eaux du bassin de la Seine

Cadre pluriannuel :

Les changements de température de l'eau affectent les quantités d'oxygène dissous, la transformation du nitrate et également le cycle du carbone. Les différents outils de modélisation développés, les scénarios hydroclimatiques, le *machine learning*, ainsi que les modèles ProSe-PA et ORCHIDEE-CaWaQS au cours de la phase 8 seront utilisés afin de comprendre l'évolution de la température dans le réseau hydrographique des petits cours d'eau jusqu'à l'estuaire de la Seine. La concaténation des données de températures en rivière sera maintenue. Les outils de *machines learning* seront adaptés afin de permettre leur utilisation sur tout le réseau hydrographique et de permettre de combler les lacunes de données. Ceux-ci permettront de réaliser des projections de la température jusqu'à 2100.

Les modèles physiques CaWaQS-ORCHIDEE seront utilisés afin d'obtenir les températures dans les différents compartiments. Les conditions aux limites de la modélisation ProSe-PA en rivière (amont et aval) seront les produits des modèles de *machine learning*. Les simulations issues de ce couplage permettront d'analyser au pas de temps horaire, l'impact d'un réchauffement sur la qualité des eaux le long de l'axe principal de la Seine.

En complément, le développement d'une modélisation de la thermie en Seine au sein de l'axe 1 s'attachera à produire des simulations à l'échelle du bassin, qui constitueront de nouveaux forçages thermiques en entrée de la modélisation pyNuts-Riverstrahler. Les simulations produites dans le cadre de ce second couplage, moins résolues spatialement et temporellement, permettront néanmoins de quantifier les effets du réchauffement des eaux de surface sur leur fonctionnement biogéochimique d'ensemble du réseau hydrographique du bassin de la Seine. Nous avons pour objectif en fin de phase de réaliser des évaluations à l'échelle de l'ensemble du réseau hydrographique, tout en avançant progressivement au cours de la phase sur des cas synthétiques et des sites ateliers, que sont la Seine à la traversée de l'agglomération parisienne et le bassin de l'Orgeval.

Programme 2025 – 2026 :

La première année de la phase démarrera par l'évaluation de la température de l'eau sur les stations de mesures de la base de données de températures en rivière du bassin à l'aide des outils de *machine learning* comme proposé par Rivière et al., 2021. Notamment les températures de la Seine et de la Marne en amont de Paris ainsi qu'en aval de la Marne seront estimées en déclinant les douze scénarios hydroclimatiques établis en phase 8 par Boé et al., 2023. Il en sera de même pour quelques points clés du réseau hydrographique de l'Orgeval, ce qui bénéficiera à l'action portée par S. Guillon.

La deuxième année sera consacrée à des simulations de l'impact du réchauffement des eaux sur leur fonctionnement biogéochimique. Pour ceci des tests de sensibilité du modèle biogéochimique RIVE seront mis en œuvre dans différents scénarios d'évolution de la température. Cette analyse suivra l'approche méthodologique développée par Wang et al. (2018), Hasanyar et al. (2023). Le modèle ProSe-PA sera ensuite mobilisé à la traversée de l'agglomération parisienne afin de simuler les impacts du réchauffement climatique en période critique d'étiage sur le fonctionnement biogéochimique du fleuve.

5.1.2 CoMoD'eau - Couleurs des Eaux et Modélisation Biogéochimique des Réservoirs

Cadre pluriannuel :

Le long du continuum aquatique, les barrages-réservoirs consomment, éliminent et stockent de façon accrue du carbone et des nutriments (Maavara et al. 2020), et peuvent apparaître, selon leur âge, leur niveau trophique, leur latitude et les conditions climatiques, comme des hot-spots d'émissions de gaz à effet de serre (GES) (Soued et al. 2022) en particulier le méthane (CH₄) et le dioxyde de carbone (CO₂). Ces réacteurs complexes intègrent une variété de processus biogéochimiques et hydrologiques étroitement liés, avec des temps de réaction de quelques heures : cycle nyctéméral du phytoplancton, gestion hydrologique, à plusieurs mois : saisonnalité de l'activité biologique, et jusqu'à plusieurs années pour la décomposition des matières organiques initialement envoyées.

Les modèles biogéochimiques s'appuyant sur une représentation mécaniste des processus aquatiques se révèlent extrêmement précieux pour mieux comprendre et quantifier le fonctionnement de ces réacteurs. Parmi eux, le modèle biogéochimique BarMan-Rive (co-développé au sein de l'UMR METIS : Thieu et al. 2006, Garnier et al. 2000, Wang et al. 2023) a récemment été implémenté sur les 3 grands barrages-réservoirs construits pour protéger Paris d'une crue hivernale et soutenir le débit d'étiage de la Seine (Yan et al. 2022). Ces travaux ont notamment mis en lumière d'importantes limites portant sur les lacunes des campagnes ponctuelles de mesures in situ, qui ne permettent pas toujours de caractériser finement et de manière fiable la dynamique spatiotemporelle des paramètres environnementaux d'intérêt pour la modélisation.

Pour pallier à cela, les techniques de télédétection permettent d'acquérir des informations spatiotemporelles riches d'intérêts pour l'étude des systèmes aquatiques. Les travaux sur « la couleur des eaux continentales » du pôle Theia (<https://www.theia-land.fr>), les projets OBS2CO (CNES, 2018-2020) ou encore les avancés du pôle de R1D ECLA (Ecosystèmes lacustres, OFB) offrent ainsi un nouvel éventail de données (en production, ou en prototypage) dont le potentiel reste encore peu exploité en recherche pour l'amélioration des modèles biogéochimiques capables de quantifier le métabolisme des barrages-réservoirs.

Les objectifs de cette action sont les suivants :

- étudier les synergies possibles entre les « nouveaux » produits dérivés d'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale et la modélisation biogéochimique des barrages-réservoirs en complément des mesures in situ effectuées par les Grands Lacs de Seine, mais complétées par cette action.
- faire progresser la modélisation BarMan sur les 4 grands barrages-réservoirs, en intégrant plus d'information sur l'hétérogénéité spatiale du fonctionnement des lacs, tant horizontalement en tenant compte des différents bassins, que verticalement en documentant leur stratification verticale (oxycline, thermocline, chimiocline)
- réaliser le couplage « on-line » des modèles BarMan et pyNuts-RS (incluant tous deux le modèle biogéochimique)
- proposer des évaluations d'impacts (incluant des modifications de gestion des ouvrages sous changement climatique) et des bilans à l'échelle du bassin (GES en particulier) en s'appuyant sur cette nouvelle chaîne de modélisation aquatique

Programme 2025-2026 :

Un premier volet concerne l'exploitation des données : tout d'abord les données Sentinel 2 et les chaînes de traitement sur la couleur des eaux continentales (stage de M2 sur le réservoir de la Marne, 2024). D'autres données spatiales seront également acquises et des collaborations seront établies avec le pôle ECLA de l'OFB (T. Tormos). En ce qui concerne les mesures physicochimiques in situ, un partenariat solide avec l'EPTB Seine Grand Lacs nous permettra d'accéder aux cahiers d'exploitation des ouvrages ainsi qu'aux suivis (mensuels de mai à octobre) de la qualité des plans d'eau et des canaux.

Des campagnes de mesures in situ complémentaires ciblant principalement les différentes formes du carbone et les GES seront menées en parallèle avec l'action C-Fluxes sur le bassin des Avenelles (S. Guillon) afin de pouvoir compléter les relevés physicochimiques fournis par SGL. Durant ces campagnes, il sera également indispensable de pouvoir réaliser des mesures radiométriques directes sur les plans d'eau afin de pouvoir établir/calibrer l'exploitation des images satellites pour les paramètres physicochimiques d'intérêt.

Dès la seconde année, l'effort portera sur l'amélioration du modèle BarMan. La meilleure compréhension du fonctionnement biogéochimique des lacs, supportée par l'analyse conjointe des données in situ et satellitaires, permettra de mieux contraindre les métabolismes aquatiques modélisés. L'implémentation d'une stratification verticale saisonnière reste critique pour la biologie et permettra d'améliorer significativement les simulations produites.

En troisième et quatrième année, des travaux de couplage avec le modèle pyNuts-RiverStrahler permettront des analyses intégrées à l'échelle du bassin de la Seine en lien avec les travaux de modélisation hydroclimatique sous climat changeant.

Co-financements :

- BIOTECA (IPSL) : financement de stage de M2
- GéoTeCa pour du matériel de terrain
- Soutien par le projet Carbonium (FairCarbon) sur la modélisation BarMan et pyNuts-RS (à préciser au niveau du WP8, portage Garnier-Flipo)

5.1.3 Fonctionnement thermique et biogéochimique des plans d'eau urbains face aux changements hydrométéorologiques

Cadre pluriannuel :

En milieu urbain, les plans d'eau constituent des écosystèmes de très grande importance pour les nombreux services écosystémiques rendus, biodiversité, paysage, îlots de fraîcheur, loisirs... Le régime thermique et l'hydrodynamique de ces lacs, qui sont tout particulièrement impactés par le changement climatique, ont une forte influence sur leur fonctionnement écologique et sur le devenir des polluants dans la colonne d'eau. Les systèmes de mesure à haute fréquence des milieux aquatiques collectent des séries temporelles de variables météorologiques, physicochimiques et biologiques, à une fine résolution temporelle, qui permettent, d'une part de quantifier des processus hydro-biogéochimiques dont les échelles de temps caractéristiques peuvent être de quelques minutes ou heures, et d'autre part, de comprendre les couplages entre fonctionnement hydrodynamique, biogéochimique et écologique, qui contrôlent l'évolution de l'écosystème. De plus, les mesures à haute fréquence sont très utiles pour le suivi d'événements hydrométéorologiques extrêmes ainsi que pour améliorer les programmes de surveillance de la qualité de l'eau, en optimisant la fréquence et la

localisation des échantillonnages, et la mesure de proxy de certains paramètres dont l'analyse est coûteuse et complexe.

Pour ces raisons, nous avons équipé deux sites expérimentaux, le lac de Champs/Marne (77) et le lac de Créteil (94), de systèmes de mesure à fréquence élevée. Le lac de Créteil et le lac de Champs-sur-Marne sont des lacs de gravière, principalement alimentés par la nappe. Les stations de mesure situées au milieu des plans d'eau sont autonomes en énergie (batterie connectée à un panneau photovoltaïque). Les mesures sont transmises à un serveur local à l'École des Ponts. Les séries temporelles sont bancarisées dans une base de données. La station d'observation du lac de Créteil fait partie depuis 2014 des systèmes d'observation de l'OSU-EFLUVE. Depuis 2020, elle est rattachée au SNO OBSERVIL (<https://sno-observil.fr/sites-dobservation/carte-des-sites>). Le lac de Créteil est aussi relié à l'observatoire de la zone critique OZCAR (<https://www.ozcar-ri.org/>). Des campagnes de terrain mensuelles, ou plus fréquentes si nécessaire, sont réalisées pour l'entretien des capteurs, la validation des capteurs avec des sondes de référence ainsi que des campagnes d'échantillonnage pour des mesures en laboratoire. Les recherches se font avec le soutien de la base de loisirs du lac de Créteil (région Île-de-France) et celle du lac de Champs (CD93).

L'imagerie satellitaire permet d'obtenir des séries temporelles spatialisées (température, transparence de l'eau, concentration en chlorophylle-a), à une fine résolution spatiale et sur des pas de temps resserrés (e.g Sentinel -2 10 à 30 m de résolution spatiale, 1 image tous les 5 jours). L'intégration de ces données avec les données mesurées au sol permettrait, à l'échelle régionale, un suivi plus régulier de la qualité des plans d'eau urbains que leur petite taille exclut des suivis DCE, mais qui sont pourtant essentiels pour la biodiversité et pour les habitants. Pour être utilisées dans un suivi régulier des petits plans d'eau, les images satellitaires doivent être étalonnées en se basant sur des mesures au sol. Nous avons entrepris le développement d'une chaîne de traitement des images Sentinel-2 (correction atmosphérique, masque du plan d'eau...) pour obtenir des concentrations en chlorophylle.

Les actions de recherche proposées portent sur :

- Le fonctionnement thermique et biogéochimique des plans d'eau ;
- L'impact d'événements extrêmes sur le fonctionnement biogéochimique des plans d'eau ;
- Le suivi de la biomasse du phytoplancton et des cyanobactéries par imagerie satellitaire.

Programme 2025-2026 :

Fonctionnement hydro-biogéochimique et épisodes extrêmes - La première étape des recherches portera sur l'analyse d'épisodes de proliférations de phytoplanctons (printemps) et de cyanobactéries (été, automne). L'analyse des séries temporelles de chlorophylle-a, de phycocyanine et d'oxygène s'attachera à relier l'évolution de ces variables avec la dynamique thermique du lac, et pour le lac de Champs, les variations de débit de la Marne voisine.

Le suivi en continu permettra de cibler les épisodes de pics et de déclin de la biomasse phytoplanctonique, et de collecter des échantillons d'eau pour des analyses spécifiques en laboratoire. Cela concernera en particulier la caractérisation de la matière organique dissoute lors des pics de biomasse et de leur effondrement. Ces données permettront de mieux quantifier les processus liés à la dégradation de la matière organique dissoute (MOD) autochtone. Ces mesures compléteront les données collectées lors d'épisodes antérieurs (Fluorescence 3D, COD...). Des modèles numériques du fonctionnement hydro-biogéochimique des lacs ont été développés lors de projets antérieurs. Des simulations correspondant aux épisodes d'intérêt fourniront des résultats utiles pour la quantification et l'analyse des processus biogéochimiques survenant pendant ces épisodes.



Utilisation de l'imagerie satellitaire pour le suivi de la dynamique phytoplanctonique - En vue de l'utilisation des images satellitaires pour le suivi régulier de la qualité de l'eau des petits lacs urbains, nous avons récemment commencé le développement d'une chaîne de traitement des images Sentinel-2 (correction atmosphérique, masque du plan d'eau...). Disposer de séries de mesures de terrain à fréquence élevée permet d'optimiser le nombre d'images satellitaires et de mesures au sol simultanées. Le croisement des données de la station de mesure en continu du lac de Créteil avec les images obtenues lors du passage de Sentinel-2 a permis d'obtenir de premières cartes de concentrations en chlorophylle. Nous proposons de poursuivre le développement de la méthodologie de calibration des images satellitaires de chlorophylle et de l'étendre à la phycocyanine, pigment spécifique des cyanobactéries.

Co-financement :

Financement de la jouvence des équipements par l'OSU ELUVE via la réponse à des appels à projets

Trois doctorats en cours :

- Deux allocations doctorales de l'École des ponts ;
- Une allocation doctorale du MTES.

Bourses de stages

- Collaboration scientifique avec MISTEA, financement de stages par le LABEX NUMEV (solutions numériques, matérielles et modélisation pour l'environnement et le vivant) de l'Université de Montpellier ;
- Projets bilatéraux (programme Brafitec avec le Brésil).

BLOC 5.2. Les transferts et transformations du Carbone dans le continuum aquatique de la Seine et aux interfaces terrestres

Le rôle joué par les hydrosystèmes continentaux dans les bilans de matières, et du carbone en particulier, demeure un sujet important de la recherche actuelle sur le changement climatique. Les processus qui contrôlent la dynamique du carbone évoluent depuis les têtes de bassin jusqu'aux grands fleuves, et des incertitudes persistent sur les flux de carbone (organique et inorganique) issus des eaux souterraines, et les rôles des extrêmes hydrologiques (crues, mais aussi étiages) dans ces processus et flux de matières.

Dans un contexte de changement global et d'anthropisation croissante des écosystèmes, il est d'autre part essentiel de mieux contraindre la dynamique de la matière organique (MO) le long du continuum HTM. Les changements globaux n'entraînent pas seulement des modifications de la quantité absolue de carbone, mais affectent également sa composition chimique notamment en lien avec les conditions hydrologiques, les processus biogéochimiques et l'activité biologique dans le milieu. Les variations de composition en MO vont en retour influencer l'activité hétérotrophe, les processus biogéochimiques et la dynamique des nutriments et contaminants.

La connaissance détaillée des flux de carbone et des propriétés et transformations de la MO est ainsi un prérequis indispensable afin de (i) mieux appréhender leur rôle au sein des processus physicochimiques et biologiques dans les milieux environnementaux, et (ii) affiner les modèles de fonctionnement biogéochimique des écosystèmes et de qualité de l'eau le long du continuum HTM.

5.2.1 C-FLUXES : Quantification des flux de carbone inorganique et organique, du bassin des Avenelles à celui de la Seine : variabilité spatiale et temporelle

Cadre pluriannuel :

Dans les territoires fortement urbanisés comme le bassin de la Seine, le réseau hydrographique et l'agriculture contribuent assez peu aux émissions de CO₂ (10 % environ) par rapport aux émissions issues des transports, du résidentiel et de l'industrie (Marescaux et al., 2018). Le bassin de la Seine, caractérisé par une activité agricole et des zones urbaines étendues, mais aussi des zones de forêts, a fait l'objet de mesures de terrain et de modélisations du transfert de carbone dans les phases précédentes du PIREN, avec en particulier l'intégration du carbone inorganique (Marescaux et al., 2020) dans le modèle biogéochimique RIVE (Wang et al., 2024). Les têtes de bassin demandent des études particulières, en raison de l'importance que les zones ripariennes y ont (Marescaux et al., 2020), mais aussi de celle des flux de dégazage de CO₂ issu des eaux souterraines. Les têtes de bassins présentent des hétérogénéités spatiales en termes de géologie et d'occupation des sols, et une variabilité temporelle en particulier liée au régime hydrologique. Des suivis à haute fréquence bien répartis spatialement sont requis pour tenir compte des variabilités spatiotemporelles des cycles biogéochimiques, mais aussi des flux d'eau, de l'échelle journalière à pluriannuelle.

Les bilans des flux de carbone seront réalisés à l'échelle du bassin de la Seine, en s'appuyant fortement sur une étude du sous-bassin des Avenelles comme observatoire représentatif des petits bassins agricoles drainés en contexte carbonaté, typiques du bassin de la Seine. Il s'agit de considérer les flux de carbone, sous toutes ses formes (inorganique et organique, dissous et particulaire), non seulement aux échelles de temps courtes (processus biologiques), mais aussi longues (altération des carbonates et silicates). Une bonne quantification des flux d'eau est nécessaire pour quantifier les flux de matière et de carbone, et la multidisciplinarité de cette action est fondamentale pour faire le lien entre modélisation hydrogéologique et processus biogéochimiques.

Programme 2025 – 2026 :

La dynamique temporelle fine des processus biogéochimiques et des flux de carbone sera quantifiée depuis l'échelle horaire jusqu'à l'échelle interannuelle, avec un intérêt particulier pour les périodes d'étiage et de sécheresse. Les données existantes, dans les bassins des Avenelles et de la Seine, seront complétées par de nouvelles mesures focalisées sur trois compartiments très dynamiques, le ru, le sol et la zone riparienne. L'hétérogénéité spatiale sera également étudiée, avec les différentes occupations du sol (agricole avec les terres arables et prairies, urbain, forêt) et la dynamique amont/aval.

- Reprise des données de suivi haute fréquence (River Lab) à l'exutoire des Avenelles pour analyser et quantifier les flux de matière dissoute issus de l'altération des roches carbonatées, et identifier des processus spécifiquement associés aux étiages/sécheresses (lien avec la thèse d'A. Mallik, IPGP, encadrée par J. Gaillardet, commencée en janvier 2024 et l'ANR GWSBound (2024-2028))
- Quantification des flux de matière en suspension exportés à l'exutoire des Avenelles (calibration entre le suivi continu de turbidité et les MES mesurées ponctuellement), et mesure du contenu en carbone organique et inorganique en vue d'estimer les flux correspondants (en lien avec les WP1 et WP4 du projet Carbonium du PEPR FairCarbon)
- Analyse des bases de données existantes (ADES, Naïdes) et des jeux de données acquis dans le cadre du PIREN-Seine pour la chimie du carbone inorganique et organique dans les eaux dans une perspective d'un changement d'échelle vers le bassin de la Seine (synergie avec le WP1 du projet Carbonium qui fera l'inventaire sur d'autres bassins en parallèle)

- Échantillonnage « snapshot » (un par an) dans le ru des Avenelles et les autres compartiments pour la caractérisation des propriétés optiques de la matière organique dissoute, l'analyse des gaz dissous comme le CO₂ pour préciser la contribution des émissions de gaz à effet de serre, mais aussi les SF₆/CFC afin de réaliser une première datation des eaux du bassin. Cette dernière information viendra contraindre les âges déterminés par les modèles hydrogéologiques.
- Installation d'une station de suivi en continu du CO₂ du sol sous couvert forestier et cultural, une station étant déjà installée sous prairie fauchée non pâturée
- Instrumentation d'un site en rivière (exutoire des Avenelles) pour le suivi continu O₂/CO₂/pH (synergie avec les suivis EAU'listic et l'ANR GWSBound)
- Échantillonnage et analyse des métaux impliqués dans le métabolisme anoxique (Fe, Mn) et du soufre dans les 6 piézomètres ripariens du site à l'aval des Avenelles, pour préciser la dynamique temporelle de la minéralisation du carbone organique (qui libère du CO₂) dans la zone riparienne

La chaîne d'analyse et d'interprétation des données partira de modèles conceptuels « en boîte », jusqu'à la modélisation spatialisée, afin d'établir les flux et les bilans aux différentes échelles. Les modèles développés dans le PIREN, tels que CaWaQS pour les flux d'eau, et pynuts-RIVERSTRAHLER pour les flux de carbone, seront mobilisés ainsi que les résultats de l'ANR GWSBound et les mesures hydrogéophysiques réalisées dans le bloc 3 de cet axe. Le bassin des Avenelles permettra de développer le modèle conceptuel et la chaîne de modélisation. Le changement d'échelle vers le bassin de la Seine intégrera la prise en compte des flux de carbone inorganique associés aux barrages-réservoirs.

- Calibration du modèle CaWaQS sur l'Orgeval (stage M2)
- Développement du modèle conceptuel et du modèle Pynuts-RIVERSTRAHLER sur le bassin des Avenelles

Co-financement :

Cette action est dans la continuité des deux précédentes phases PIREN-Seine à l'interface d'un certain nombre d'autres initiatives de recherche en cours, elle bénéficiera naturellement d'appui en termes de ressources humaines et financières qui représentent autant de co-financements.

Au sein du PIREN, cette action fonctionnera en synergie avec les actions EAU'listic (action 4.2.3, Jérémie Lebrun), l'action CoMod'Eau de modélisation des réservoirs (5.1.2), l'action Fluocopée (5.2.3) et l'action Trac'eau (5.3.1) et l'axe 1.

Cette action intègre également la thèse d'Amita Mallik (IPGP 2024-2027) autour des suivis haute fréquence (River Lab) à l'exutoire du bassin des Avenelles. Un ingénieur sera financé par INRAe (2024-2025) pour contribuer à maintenir le fonctionnement du River Lab. Les développements instrumentaux menés dans TerraForma (financement « Équipement » jusqu'en 2028) seront investis dans cette action. Les personnes financées par le projet Carbonium du PEPR FairCarbon participeront également aux interprétations des données (WP1 « analyse de données » en 2025, WP5 « GES » 30 000 € en 2025-2026) et à la modélisation à l'échelle du bassin de la Seine (WP8 « modélisation » 25 000 €, 2026-2028). Les budgets demandés pour cette action s'appuient donc sur ces divers cofinancements acquis dans les grands projets nationaux (TerraForma, FairCarbon) et autour du site OZCAR de l'Orgeval, qui candidate à l'infrastructure eLTER.

5.2.2 Suivi le long de l'axe Seine des transferts de matière organique et métaux (SAXSO)

La connaissance de la matière organique (MO) et de sa chimiodiversité est nécessaire pour comprendre le cycle et le transport du carbone, le métabolisme des rivières et la modélisation de la qualité de l'eau le long du continuum Homme-Terre-Mer (HTM). La compréhension des transferts et transformations sur l'ensemble du continuum implique d'autre part une meilleure prise en compte des milieux d'interface. Des descripteurs de la MO liés à la végétation, à l'utilisation naturelle ou anthropique des terres, aux processus biogéochimiques (stockage, transfert et transformation du carbone) en fonction des conditions environnementales (hydrologie, température, événements extrêmes, salinité) sont encore nécessaires pour comprendre et simuler les apports latéraux, des berges et zones humides notamment, et les effets des pratiques de gestion et des événements naturels sur les processus fonctionnels. Les zones d'interface remplissent en effet des fonctions écologiques clés et jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement biogéochimique des écosystèmes fluviaux, notamment en ce qui concerne la dynamique de la MO et le cycle des éléments. La qualité des eaux dépend en grande partie de ces flux de matières qui restent mal documentés.

Le travail multidisciplinaire réalisé au cours des précédentes phases du PIREN-Seine (Baratelli et al., 2023a ; Huguet et al., 2019; Parlanti et al., 2019, Varrault et al., 2020) a permis de caractériser la MO dans les différents compartiments de l'hydrosystème Seine en échantillonnant différents types d'eau (eaux de surface, souterraines et rejets de stations de traitement d'eaux usées) et des sites avec des occupations du sol variées (agricole et urbaine). Le suivi de la dynamique de la MO dissoute (MOD) et particulaire (MOP) sera poursuivi le long de l'axe Seine, mais aussi dans l'Oise et la Marne afin de mieux appréhender la variabilité des caractéristiques de la MO observée après leur confluence avec la Seine. Une attention particulière sera portée également aux zones amont, têtes de bassin et sous-bassins forestiers ainsi que sur la prise en compte des sols et de la végétation et la caractérisation de leurs apports spécifiques en MO et produits de transformation. En complément, un suivi des éléments traces métalliques et de leur spéciation sera également réalisé le long du continuum et permettra de disposer de nouveaux indicateurs de la réactivité de la MOD vis-à-vis des métaux par mesure des teneurs en fonctions acido-basiques et thiols.

D'autre part, afin de faire le lien entre la dynamique de la MO et l'écodynamique des contaminants, l'échantillonnage pour la caractérisation de la MO sera réalisé en concertation avec les actions menées sur les contaminants dans l'axe 4. L'analyse statistique des résultats obtenus lors de la phase 8 du PIREN-Seine pour les sites historiques de Marnay-sur-Seine, Bougival, Triel-sur-Seine et Poses a en effet mis en évidence des liens, variables en fonction des familles de composés considérées, entre les concentrations des contaminants organiques suivis et certains composants ou descripteurs de la MOD fluorescente (Baratelli et al., 2023b).

Ce travail viendra enrichir la base de données déjà acquise le long de la Zone Atelier Seine lors des phases précédentes du PIREN-Seine (Baratelli et al., 2023a) et du GIP Seine-Aval le long de l'estuaire (Thibault et al., 2019), ce qui permettra une meilleure prise en compte, sur un temps plus long, de l'effet des changements globaux (forçages hydrologiques [crue, étiage/assec] et thermiques) sur les sources, transformations et devenir de la MO le long de l'axe Seine, du fleuve jusqu'à l'estuaire, et fournira un jeu de données conséquent de descripteurs de la MO pour la modélisation du carbone et de la qualité de l'eau.

Programme 2025 – 2026 :

Plusieurs campagnes de prélèvements sont prévues en situations hydrologiques et/ou saisonnières contrastées en fonction des forçages hydrologiques (crue, étiage) et thermiques.



Trois campagnes par an en 2025 et 2026 (communes avec les actions 4.2.1 et 4.2.2) sont prévues le long de l'axe fluvial Seine (sites historiques Marnay / Bougival / Triel / Poses + site stagnant du lac des Deux Amants (cyanobactéries) ; de la Marne (pressions agricole et urbaine - sous-affluents Orgeval/Le Grand Morin et Champigny) ; de l'Oise (affluent de la Seine, pression urbaine, industrielle et agricole - Villers St Paul et Cergy-Pontoise [apports urbains]). Ces campagnes seront complémentaires du suivi haute fréquence de la fluorescence de la MOD avec le déploiement de sondes Fluocopée [5.2.3], et pourront préciser la variabilité spatiotemporelle et la dynamique de la MOD à l'échelle par exemple de petits sous-bassins ou dans les zones amont de l'Oise, Marne et Seine et/ou au niveau de leurs confluences.

Les propriétés optiques de la MOD [absorbance UV-Visible et fluorescence 3D] seront déterminées pour l'ensemble des échantillons et permettront de fournir des informations globales sur sa structure et ses propriétés générales [taille, aromaticité, dégradabilité...] en lien avec les différentes sources [aquatiques, terrestres, empreintes spécifiques] et d'évaluer leurs transformations et leur dynamique spatiotemporelle dans les zones étudiées.

Des titrages acido-basiques spectrophotométriques et avec qBBr par fluorimétrie permettront d'autre part de préciser le rôle joué par la MOD sur la spéciation des contaminants inorganiques, notamment via l'analyse de ses groupements complexant les métaux [ex. : groupement carboxyliques, phénoliques et thiols]. Les teneurs en éléments traces métalliques seront également analysées par ICP-MS [plateforme PARI de l'IPGP] afin de démontrer une potentielle influence de la qualité de la MOD sur la spéciation de ces éléments.

Le suivi de la qualité et de la quantité de MOP au sein des matières en suspension sera réalisé via l'utilisation combinée des rapports élémentaires [C/N] et isotopiques [$\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$] du carbone et de l'azote organiques particulaires. Ces outils permettent de discriminer les différentes sources de MOP [allochtone naturelle et anthropique, autochtone] dans les systèmes aquatiques.

Co-financement :

Projets du Programme Seine-Aval 7 CAFEZH [Cartographie des Fonctions écologiques des Zones Humides de la vallée estuarienne de la Seine) - 2022-2025 et EVEREST (EVALUATION du fonctionnement écologique des vasières latérales en amont de Tancarville pour guider de nouveaux projets de RESTAURATION écologique par une approche comparative de la biodiversité fonctionnelle des communautés benthiques) - 2023-2026

Thèse de Yumei Hu (10/2023 – 10/2027), financement CSC/SU (directeurs : A. Huguet et E. Parlanti) ;

ANR PRC (2023-2027 ; IPGP-Géosciences Rennes). « COLOSSAL » : *COLLOID control the environmental fate of redox-Sensitive trace elements* (498 k€). ANR-23-CE01-0001 (PI : Rémi Marsac) ;

ANR France Relance (2022-2024) « DOMMINO » : *Dissolved Organic Matter Monitoring with Innovative Optics* : automatisation des dosages acido-basiques de la matière organique dissoute pour une instrumentation de terrain (205 k€, PI). (co-PIs : Rémi Marsac et Boris Pédrone de l'entreprise IDIL Fibres Optiques) ;

Projet SIGNIFICANCE « *Effects of anthropogenic changes on the speciation of the reduced organic sulfur and associated metals* » soumis à l'AAP ANR 2024.

5.2.3 Caractérisation de la dynamique de la MO en rivières grâce à un suivi à haute fréquence (Fluocopée)

Cette action s'inscrit dans la suite des travaux des phases 7 et 8. En phase 7, les travaux menés dans le cadre de la thèse d'Angélique Goffin avaient permis de montrer l'intérêt de l'analyse en

spectrofluorescence pour estimer la concentration en carbone organique dissous (COD) en rivière. En phase 8, la biodégradabilité de la matière organique (MO) contenue dans les rejets urbains (temps sec et temps de pluie) et en rivière (Seine et Marne à l'amont de l'agglomération parisienne) a été étudiée (thèse Nadège Musabimana). Le suivi cinétique de la biodégradation de la MO a mis en évidence des traceurs issus de l'analyse en spectrofluorescence permettant la détermination des concentrations en COD rapidement et lentement biodégradable et en COD réfractaire (CODRB, CODLB et CODR).

Parallèlement à ces actions de recherche, la sonde de fluorescence Fluocopée a été développée (LEESU-SIAAP) et permet l'analyse haute fréquence, in situ de 29 fluorophores liés à la MOD. L'utilisation combinée de cette sonde de fluorescence avec les travaux des phases 7 et 8 va donc permettre en phase 9 de caractériser les concentrations de COD, CODRB, CODLB et CODR en temps réel et à haute fréquence (toutes les 15 minutes).

Plusieurs sondes Fluocopée seront ainsi déployées sur différents terrains, la Seine et ses principaux affluents en amont de l'agglomération parisienne, l'Orge et l'Orgeval. Ces sondes vont permettre des mesures en continu des concentrations de COD, CODRB, CODLB et CODR, qui sont d'un grand intérêt pour la modélisation des processus liés à la dégradation de la MO en Seine. L'obtention de ces concentrations à haute résolution temporelle va permettre de déterminer des flux précis de ces différents paramètres. De plus, ces mesures de fluorescence vont permettre de caractériser la nature de la MO et la variabilité temporelle de ses sources (terrigène, autochtone), des transformations qu'elle a subies et de sa réactivité.

Le LEESU en collaboration avec le SIAAP et le SEDIF déploie un observatoire de la MOD en rivière (Seine, Marne et Oise) avec notamment l'installation de 3 sondes Fluocopée sur les stations de potabilisation du SEDIF à Choisy-le-Roi (Seine), Neuilly-sur-Marne (Marne) et Méry-sur-Oise (Oise). La caractérisation de la variabilité à haute résolution temporelle mesurée en Seine, Marne et Oise sera tout à fait complémentaire de l'étude de la variabilité spatiale de la dynamique des propriétés optiques de la MOD réalisée dans l'action SAXSO (5.2.2) le long de l'axe Seine.

Une sonde Fluocopée sera également utilisée dans le bassin versant de l'Orgeval pour caractériser la variabilité temporelle des transferts de MOD des sols vers les milieux aquatiques en fonction de l'occupation des sols (forêt, agriculture). En plus de la détermination des concentrations et des flux de COD, CODRB, CODLB et CODR, les mesures de fluorescence à haute fréquence vont également permettre de caractériser avec une haute résolution temporelle la nature de la matière organique et ainsi de mieux identifier ses sources (terrigène, autochtone), les transformations qu'elle a subies et sa réactivité en prenant en compte la variabilité temporelle. Il s'agit ici de mieux comprendre la dynamique de la matière organique en lien avec les pratiques anthropiques (occupation des sols) et les changements climatiques. Les mesures à haute résolution temporelle permettent d'accéder aux flux des différentes espèces du carbone organique en lien avec les actions de modélisation du carbone proposées dans l'action C-FLUXES (5.2.1). La caractérisation de la variabilité spatiale des propriétés optiques de la MOD réalisée dans les différents compartiments du sous-bassin des Avenelles (action C-FLUXES [5.2.1]), permettra d'obtenir des informations complémentaires sur la dynamique de la MOD dans le bassin versant de l'Orgeval. Cette sonde Fluocopée pourra d'autre part rester en place de manière pérenne sur le bassin de l'Orgeval après la fin de la phase 9 afin de disposer de longues séries temporelles.

Les bassins versants urbains sont, d'autre part, caractérisés par de grandes surfaces imperméables et des apports directs d'eaux de ruissellement aux milieux récepteurs. Ceux-ci peuvent être rapides et très concentrés en matière organique (MOD) urbaine et nutriments qui peuvent induire des épisodes de désoxygénation et influencer les processus biogéochimiques des milieux récepteurs. Les caractéristiques et le devenir spatiotemporel de la MO pendant et lors de ces épisodes de temps de pluie restent encore mal définis. Afin d'apporter de nouvelles connaissances sur les dynamiques de qualité et quantité de MOD dans les milieux récepteurs à l'échelle d'un bassin versant soumis à une urbanisation graduelle, le bassin de l'Orge sera étudié. Il présente une occupation des sols de type forestière à l'amont qui devient fortement urbanisée à l'aval avant sa confluence avec la Seine. La



sonde Fluocopée sera utilisée pour obtenir des informations *in situ* et à haute fréquence de la MOD, jamais obtenues auparavant pour ces échelles spatiales et temporelles (profil de l'amont à l'aval du bassin versant à différentes périodes d'une année hydrologique (crues, étiages) ; profil amont-aval (temps sec vs pluie) de plusieurs rejets urbains (déversoir d'orage, rejets de stations d'épurations). Les flux de MO (quantité et qualité) obtenus permettront d'apporter des informations importantes pour le calage de modèles biogéochimiques.

Programme 2025 – 2026 :

- En 2024 : déploiement des 3 sondes Fluocopée sur les stations de potabilisation du SEDIF à Choisy-le-Roi (Seine), Neuilly-sur-Marne (Marne) et Méry-sur-Oise (Oise) ;
- En 2025 et 2026 : déploiement de la sonde Fluocopée sur le bassin versant de l'Orgeval ;
- De 2025 à 2028 :
 - Maintenance des sondes déployées sur sites, calibration périodique,
 - Validation des mesures, prélèvements ponctuels pour analyse avec un spectrofluorimètre de paillasse, comparaison avec les mesures Fluocopée,
 - Pour tous les sites, mise en place de campagnes contradictoires : mesure des concentrations en COD, CODRB, CODLB et CODR avec les méthodes de référence en laboratoire et comparaison avec les mesures obtenues via Fluocopée,
 - Traitement des données et analyse des chroniques obtenues sur les différents sites (Seine, Marne, Oise, Orge, Orgeval),
- De 2026 à 2028 (pour l'Orge) :
 - Réalisation de plusieurs profils longitudinaux de l'Orge selon la saison et situation hydrologique,
 - Profils transversaux d'un déversoir d'orage et d'un rejet de station d'épuration des eaux usées par temps sec et temps de pluie avec sonde Fluocopée®,
 - Implémentation d'une sonde pendant une année hydrologique sur le bassin de l'Orge,
 - Traitement des données.

Co-financement :

- Thèse Antoine Raoult (2022-2025) (demi-allocation financée par le SIAAP, demi-allocation financée par l'UPEC) ;
- Financement des 3 sondes Fluocopée pour les stations de potabilisation du SEDIF (100 k€ par le SEDIF) ;
- Le LEESU va faire l'acquisition d'une sonde Fluocopée en 2024 (financements UPEC acquis). En outre, afin d'avoir deux sondes disponibles pour les mesures dans le BV de l'Orgeval et de l'Orge, une demande de financement d'une autre sonde Fluocopée est demandée au PIREN-Seine (30 k€).

BLOC 5.3. Modélisation des transferts hydrosédimentaires et dynamique de la contamination en pesticides dans le bassin de la Seine

Le transfert des eaux souterraines vers les cours d'eau joue un rôle majeur dans la transmission des contaminants des réservoirs hérités vers les eaux de surface. Cependant, les processus de recharge et de transport des nutriments et des pesticides de la zone non saturée vers l'aquifère souterrain, avant leur arrivée dans le réseau hydrographique, demeurent insuffisamment compris. Pour appréhender l'évolution des pesticides et des nutriments, il est crucial de saisir les mécanismes de déplacement de l'eau depuis la surface jusqu'à l'aquifère, puis vers le réseau hydrographique. Une connaissance approfondie de ces interfaces est indispensable pour évaluer les effets des variations spatiotemporelles sur les ressources en eau, permettant ainsi une modélisation précise des écoulements et des flux lors de périodes critiques telles que les sécheresses ou les inondations. Par ailleurs, l'érosion des sols impacte considérablement le fonctionnement biochimique des réseaux hydrographiques. Les conditions hydrologiques vont contrôler l'érosion des éléments solides et les flux de pollution particuliers associés parvenant jusqu'aux rivières et vont également imposer les conditions de dilution dans le milieu aquatique, capables de conditionner l'impact de certains rejets ponctuels, mais également de contrôler les possibilités de développement des microorganismes (taux de croissance vs taux de dilution).

Ce troisième bloc traitera également de l'évolution des pesticides de leur épandage, leur stockage dans la zone non saturée, les aquifères jusqu'à leur relargage et leur transformation au sein du réseau hydrographique. L'utilisation des pesticides comporte des risques pour la santé humaine et environnementale, tant à court qu'à long terme. Cependant, même après l'adoption de normes et la mise en œuvre du plan Écophyto visant à réduire l'utilisation de certains pesticides, les concentrations dans les eaux de surface et les eaux souterraines peuvent rester élevées, notamment en période d'étiage, en période de crue ou juste après leur épandage. Cela est probablement dû aux stocks résiduels accumulés dans le sol (zone non saturée) et les eaux souterraines, qui se déchargent ensuite dans le réseau hydrographique. Les interfaces présentes dans la zone critique, telles que les interfaces nappe-rivière et la zone non saturée, ainsi que les infrastructures anthropiques comme les réseaux de drainage, représentent des foyers majeurs de rétention, de production, de transformation et de transfert de composés organiques, de carbone, de nutriments et de contaminants.

5.3.1 Trac'eau : Tracer et quantifier les flux d'eau aux interfaces

Cette action vise à comprendre et à quantifier les processus et les flux à travers différentes interfaces du cycle de l'eau. À l'interface atmosphère-surface-subsurface, nous nous intéresserons aux processus d'infiltration d'eau dans les sols drainés, d'échange nappe-rivière, de recharge des aquifères, qui sont mal décrits.

L'appréhension territoriale des continuums Homme-Terre-Mer (HTM) est rendue complexe par la diversité des processus hydrologiques et géochimiques qui s'interconnectent dans le temps et dans l'espace. Le continuum HTM est composé de différents compartiments et d'interfaces clés qui s'insèrent dans la zone critique. Cette zone critique s'étend de l'atmosphère jusqu'aux aquifères, où sont concentrées les ressources naturelles essentielles pour nos sociétés, par conséquent la zone impactée par les activités humaines (Gaillardet et al. 2018). Ces interfaces sont composées d'hétérogénéités spatiales qui influencent les connectivités entre les compartiments comme les interfaces nappe-rivière et la zone non saturée, mais également les installations anthropiques comme les réseaux de drainage. Celles-ci constituent des *hot-spots* de rétention, de production, de transformation et de transfert des matières organiques, du carbone, des nutriments et des



contaminants. La quantification des flux dans ces interfaces est une question clé pour pouvoir quantifier les flux d'eau, de soluté et de chaleur. La compréhension fine de ces interfaces est nécessaire afin d'évaluer les effets des continuités et discontinuités spatiotemporelles sur les ressources en eau. Le partage de la pluie nette entre l'infiltration (recharge aquifère, les écoulements de subsurface (drainage) et les échanges nappe-rivière est un point bloquant dans les outils de modélisation du PIREN-Seine du fait de leur granulométrie spatiotemporelle.

Le fonctionnement hydrologique d'un sol drainé est fortement influencé par la présence des tuyaux perforés enterrés de drainage agricole. Le drainage agricole permet d'évacuer les excès d'eau temporaires dans le sol durant la saison humide. Cela engendre une augmentation de la capacité d'infiltration du sol et, en conséquence, une réduction du ruissellement de surface (Augeard et al., 2005 ; Kao et al., 1998 ; Henine, 2010). Il existe trois points bloquants que les modélisations régionales actuelles ne prennent pas en compte ou dont la validation n'est pas permise faute de données : les hétérogénéités spatiales, l'effet mémoire ainsi que le partage de l'eau entre recharge des aquifères et eaux drainées vers le réseau hydrographiques. Ces trois points sont nécessaires afin de modéliser finement les écoulements d'eau et les flux de carbone dans les différentes interfaces notamment pendant les périodes de crise (sécheresse, inondation, vague de chaleur...).

L'objectif de cette action consiste à associer la mesure géophysique aux mesures classiques hydrogéologiques pour mieux caractériser les flux d'eau, de chaleur et de solutés invisibles. Une partie de notre ignorance vient du fait que les flux qui se produisent sous nos pieds représentent encore une *terra incognita*. Contrairement aux méthodes de mesures locales, l'avantage d'utiliser la mesure géophysique est d'acquérir une information spatialisée. Ces avantages ont rendu son utilisation très répandue dans différentes études hydrologiques et environnementales. Dans cette action, nous utiliserons donc des approches hydrogéophysique multiméthodes pour surmonter le manque de données in situ directes. Les méthodes qui seront utilisées seront la température (Cucchi et al., 2018), la sismique (Dangeard et al., 2021, la méthode de la tomographie de résistivité électrique (ERT) et l'électromagnétique (Finco et al. 2023,). La réalisation de ces différentes méthodes nous permettra d'obtenir une meilleure compréhension des flux.

La mise en évidence des flux dans la zone critique s'appuiera sur plusieurs approches :

1. **Mesure hydrologique des flux de drainage** : Sur la parcelle de Boissy-le-Châtel (BV de l'Orgeval) et la station à l'exutoire du bassin de l'Orgeval, le suivi de débit de drainage de la pluie et de la teneur en eau dans le sol permettra de faire une analyse du comportement du système, en se basant sur l'application des méthodes hydrologiques classiques, permettra de comprendre le schéma de circulation de l'eau dans le sol et de localiser dans le temps la période de recharge des nappes. Cette recharge peut être estimée à partir d'un calcul du bilan hydrique. La dynamique de ces infiltrations sera ensuite validée par les variations piézométriques, suivi à plusieurs endroits sur le bassin versant de l'Orgeval.
2. **Multi-approche hydrogéophysique** : Des prospections sur terrain réalisées sur des périodes clés en utilisant les méthodes d'ERT, de sismique et d'EM permettra d'étudier la spatialisation de l'information ponctuelle à l'échelle de toute la parcelle obtenue par l'étude hydrologique et de pouvoir valider la fiabilité de la première approche. Cette approche se basera sur des analyses de tomographies de résistivités électriques à différentes périodes « en time-lapse » afin d'étudier l'évolution de l'état humide d'un profil de sol. Une partie des mesures seront réalisées dans le cadre de l'ANR GWSBound.
3. **Méthodes d'inversion combinées** : Ces méthodes seront développées dans le cadre de l'ANR GWSBound.

4. **Des approches de modélisation numérique** : elle permettra de transcrire le schéma de circulation de l'eau dans la zone critique
5. **Transmission de la connaissance** : Les connaissances produites seront transformées afin d'alimenter l'action CFLUX sur le transport du carbone ainsi que pour améliorer la modélisation régionale des flux d'eau et de chaleur sur les têtes de bassin.

Cadre pluriannuel :

Entre 2025 et 2028, l'ensemble des suivis hydrologiques et géophysiques seront réalisés sur la parcelle de Boissy-le-Châtel ainsi que l'exutoire du bassin versant de l'Orgeval pour une caractérisation précise des dynamiques des flux. Nous souhaitons également réaliser des expérimentations de traçage ponctuelles pour suivre le cheminement de l'eau en période critique (étiage, crue).

Entre 2025 et 2028, des campagnes de mesures EM seront répétées et synchronisées avec les campagnes sismiques et thermiques de l'ANR GWSBound. Le principal objectif sera d'évaluer l'hétérogénéité de la zone vadose, et d'exploiter les résultats de cartographie EM à un instant t pour spatialiser et interpoler les informations obtenues à partir des profils sismiques, thermiques et électriques.

L'objectif secondaire sera l'évaluation des performances de monitoring par mesures EM, idem pour spatialiser et interpoler les variations temporelles du milieu estimées par les mesures sismiques et électriques.

À partir de 2027, nous commencerons le travail de modélisation pour intégrer le fonctionnement de drainage dans une modélisation hydrologique à l'échelle de la parcelle et du bassin versant des Avenelles.

En 2028, une modélisation à long terme pour reconstituer la dynamique annuelle de ces infiltrations et d'identifier les périodes critiques en rapport avec les périodes d'épandage agricoles.

Programme 2025 – 2026 :

2025 : Suivi continu hydrologique et géophysique sur la parcelle de Boissy le Châtel (équipement + fonctionnement + temps chercheurs, ingénieur et technicien + Master 2) :

- Caractérisation précise de la dynamique des infiltrations sous le réseau de drainage et dans le drain ;
Mise en place d'un suivi géophysique (ERT) avec le montage de l'OHMPI avec un déclenchement de la mesure en fonction des cumuls pluviométriques ;
- Évaluation à l'échelle de l'année des variations de l'infiltration profonde à partir des suivis hydrologiques et géophysiques ;
- Poursuite des campagnes hydrogéophysiques.

2026 : Cartographie EM de la parcelle de l'exutoire du bassin versant (fonctionnement + Master 2) :

Campagnes de mesures EM synchronisées avec les mesures sismiques & utilisation des mesures ERT pour la calibration

- Construction d'un modèle de conductivité électrique après calibration et inversion des données EM et estimation de la permittivité diélectrique (deux paramètres électriques pouvant être reliés à la lithologie — teneur en argiles — ou à la saturation en eau). Évaluation du co-kriegage avec les résultats EM à un instant t utilisés comme variable auxiliaire.

**2027 : Poursuite des suivis hydrologiques et géophysiques (fonctionnement, temps de recherche, ingénieur et technicien, Master 2) :**

Identification des périodes critiques des infiltrations sous le drain en lien avec les pratiques agricoles.

- Poursuite des campagnes hydrogéophysiques

2028 : Synthèse des différents résultats obtenus gr (fonctionnement + Master 2) :

- Quantification de la résilience du fonctionnement hydrologique en période critique (sécheresse, crue).

Co-financement :

- Financement des équipements et du fonctionnement par INRAE (Département AQU, par METIS et par MINES PARIS)
- La caractérisation hydrogéologique tridimensionnelle de la zone critique est primordiale pour la modélisation des flux et des échanges entre les eaux de surface et souterraines. Dans le cadre de l'ANR GWSBound portée par Agnès Rivière, des mesures sismiques (réfraction et ondes de surface), thermiques et hydrogéologiques seront combinées sur plusieurs profils pour construire un modèle hydrogéologique 3D. Ce projet est un apport de 304 000 € avec le financement d'une thèse et d'un postdoc. Le financement demandé concerne des masters 2 et quelques missions.

5.3.2 HydroSedSeine, Fonctionnement hydro-sédimentaire et biogéochimique des rivières : apports de l'imagerie satellitaire pour la modélisation du bassin versant de la Seine

La qualité des eaux continentales est soumise à de nombreuses contraintes naturelles (hydromorphologique, climatique, etc.) et anthropiques (rejets ponctuels, pollutions diffuses) qui contrôlent le métabolisme des écosystèmes aquatiques se succédant depuis les plus petites rivières jusqu'aux grands secteurs fluviaux. Parmi ces contraintes, les conditions hydrologiques vont contrôler l'érosion des éléments solides et les flux de pollution particuliers associés parvenant jusqu'aux rivières. Elles vont également imposer les conditions de dilution dans le milieu aquatique, capables de conditionner l'impact de certains rejets ponctuels, mais également de contrôler les possibilités de développement des microorganismes (taux de croissance vs taux de dilution). Enfin, les vitesses d'écoulement vont d'une part déterminer le temps de séjour des masses d'eau (et la réactivité biogéochimique associée), et d'autre part contrôler la dynamique des éléments particuliers dans la colonne d'eau (érosion, transport, déposition) et à l'interface avec le sédiment benthique. Le développement de modèles capables de décrire conjointement le fonctionnement hydro-sédimentaire et biogéochimique des écosystèmes aquatiques peut permettre de quantifier la contribution respective de ces facteurs de contrôles dans l'espace (à l'échelle d'un bassin versant) et dans le temps (variations saisonnières).

L'outil de modélisation sera le modèle pyNuts-Riverstrahler (Thieu et al. 2017) qui permet de concilier une représentation mécaniste des processus hydrologiques et biogéochimiques opérant dans le continuum aquatique (modèle RIVE : Billen et al., 1994 ; Wang et al. 2023, (<https://gitlab.in2p3.fr/rive>).

Programme 2025 – 2026 :

Le premier objectif sera de revisiter (spatialement et temporellement) les méthodes de quantification du transport des sédiments vers les compartiments aquatiques. En effet, beaucoup de travaux évaluent l'érosion brute (Cerdan et al., 2010) et impliquent une redistribution spatiale du matériel érodé ainsi que la calibration d'un coefficient d'export (Delmas et al. 2009) pour évaluer l'érosion nette vers les hydrosystèmes. Plus récemment le modèle WaTEM/SEDEM de (Borrelli et al. 2018) a permis l'estimation de flux érosifs nets moyens pluriannuels avec une résolution spatiale de 25 m permettant d'estimer des apports totaux au réseau hydrographique. Si l'amélioration du grain spatial est significative, la dynamique temporelle pourrait s'améliorer avec l'utilisation de l'imagerie satellitaire.

En fin de première année : ces résultats, au-delà d'une meilleure quantification des matières en suspension, contribueront à améliorer l'ensemble des apports diffus particuliers associés, en entrée du modèle pyNuts-Riverstrahler (principalement les variables phosphore inorganique total PIT, carbone organique particulaire POC et silice amorphe ASI).

Dans sa configuration actuelle, le modèle pyNuts-Riverstrahler intègre les flux d'eau et les apports diffus de matière en suspension comme conditions limites à la modélisation biogéochimique du réseau hydrographique. Un second enjeu portera sur la modélisation des vitesses d'écoulement et des capacités de dilution hydraulique tout le long du réseau hydrographique. Il s'agira dans un premier temps d'améliorer la représentation des débits au sein du modèle, en couplant le modèle biogéochimique aux modèles hydrodynamiques GR ou CaWaQS qui permettent des simulations distribuées des débits à partir des forçages climatiques. La modélisation pyNuts-Riverstrahler s'appuie sur plusieurs paramètres morphologiques (pentes, largeur, coefficient de Manning) en complément du débit pour estimer les hauteurs d'eau et les vitesses des écoulements. Leur détermination est basée sur des couches topographiques précises, et des bases d'information hydromorphologiques récentes (CarHyCe, Gob et al. 2014), mais pourrait également bénéficier des nouveaux observables de hauteurs d'eau produits par les chaînes de traitements satellitaires à partir de la mission SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*).

En fin de seconde année : ces résultats permettront d'identifier la contribution respective des contrôles hydrologiques et biogéochimiques dans le fonctionnement de la Seine, et caractériser sa sensibilité dans un contexte de changement climatique impliquant des crues plus intenses et des étiages plus sévères (Raimonet et al. 2018).

Enfin, un troisième volet portera sur la modélisation du transport sédimentaire. Deux composantes de débit (sub-surface et souterraine) sont requises, et la capacité de transport est directement reliée à la vitesse des écoulements à partir d'un formalisme conceptuel (Velikanov). Plusieurs approches existent pour déterminer les flux sédimentaires. Il s'agira de tester plusieurs configurations : simples modèles de puissance (Asselman 2000), modélisation empirique basée sur les contraintes de cisaillement (p. ex. Meyer-Peter et Müller 1948) ou modélisation conceptuelle à réservoir (Lidén 1999). Les chaînes de traitement couleur des eaux continentales (pôle Theia, <https://www.theia-land.fr>) pourront être mobilisées conjointement aux observations *in situ* de la turbidité et des matières en suspension (MES), afin de valider les simulations.

En permettant de mieux représenter les niveaux de concentration en MES dans les cours d'eau, ce troisième volet de recherche améliorera la simulation de certains éléments dissouts (ex. : orthophosphates PO₄) adsorbés sur les fractions particulières. De même, l'impact sur les conditions d'éclairement (coefficients d'extinction intégrés sur la profondeur de la colonne d'eau) et la production primaire modélisée par le modèle RIVE bénéficiera indirectement de ces travaux.

Co-financement :

Bourse de thèse CSC – China Scholarship Council : 64 800 € pour la rémunération d'une thèse de doctorat de 48 mois (soit 1350 € net/mois).

Soutien du projet FairCarbon sur la modélisation des flux particuliers de C (à préciser au niveau du WP8, lead Garnier-Flipo)

Un complément est demandé au PIREN pour atteindre la rémunération de base en vigueur dans l'ED GRNE (1541 € net/mois) et pour permettre un fonctionnement minimum de l'action PIREN (1 valorisation scientifique par an)

5.3.3 Compréhension et modélisation du transfert des pesticides à l'échelle du bassin de la Seine

La compréhension du transfert des pesticides sur le long terme sur le bassin de la Seine reste une thématique d'intérêt majeur, notamment depuis la remise en cause du plan Ecophyto. Au regard de l'actualité, il est urgent de montrer les répercussions des actions actuelles et passées de l'usage des pesticides sur la qualité de la ressource en eau du bassin de la Seine, qu'elle soit souterraine ou de surface. Pour analyser la trajectoire sur le temps long de l'usage des pesticides et comprendre son impact sur la qualité des ressources en eau souterraine et superficielle, nous nous proposons de caractériser les pressions phytosanitaires à différentes échelles. Jusqu'à présent, deux approches ont été menées : (i) une approche de modélisation statistique par l'utilisation des données Naïades et ADES pour déterminer les tendances d'évolution de la contamination dans les aquifères et leur contribution aux eaux de surface (Mattei, 2014) et (ii) une approche par modélisation hydrogéologique en renseignant autant que possible les usages phytosanitaires et en implémentant des formalismes de transformation et de sorption des pesticides dans le modèle agronomique STICS rebaptisé PeSTICS (Queyrel, 2016). Cette approche de modélisation a tout d'abord été réalisée sur des petits bassins versants pour limiter le travail de recensement des usages.

Au cours de la phase précédente du PIREN-Seine, un travail considérable de recherche de données anciennes d'utilisation des produits phytosanitaires a été mené et intégré dans la base de données Arseine qui décrit les pratiques agricoles du bassin. La période considérée s'étend de 1970 à 2010. Ces données d'Arseine alimentent la plateforme de modélisation PeSTICS-CaWaQS-pyNuts-Riverstrahler pour simuler le transfert des nitrates vers les nappes et rivières et l'objectif est de simuler également le transfert de pesticides. De nouveaux formalismes de transfert et de transformation des pesticides dans le réseau hydrographique ont été intégrés au modèle pyNuts-Riverstrahler. Ces travaux de modélisation du transfert des pesticides seront poursuivis en phase 9.

Programme 2025 – 2026 :

Analyser les données issues de la base de données BNV-D décrivant l'évolution temporelle de l'usage des pesticides par petites régions agricoles sur la période 2008- 2022 devra notamment permettre de produire l'inventaire de l'usage des pesticides sur la période 1970-2010 reste parcellaire : certaines grandes régions agricoles ne sont pas renseignées et pour celles qui le sont, il faut vérifier la représentativité des données obtenues. L'approche par enquête est trop fastidieuse et complexe pour retrouver des données pour toutes les cultures, sur toutes les grandes régions agricoles, pour toutes les périodes de pratiques agricoles homogènes et ne sera pas poursuivie. Cependant, les données acquises permettent d'avoir une idée de l'évolution de certaines pratiques sur le temps long. Ce travail reste à approfondir pour les rotations de culture déjà renseignées et voir dans quelle mesure il est possible de les extrapoler à d'autres GRA.

Par ailleurs, la BNV-D ventes (depuis 2008) et la BNV-D Achat (depuis 2013) sont des sources de données spatialisées permettant de renseigner les usages actuels. Cependant, les informations qu'elles contiennent ne font pas le lien avec les pratiques phytosanitaires (date d'application, dose,

culture) et ne permettent donc pas de tester des scénarios de changement des pratiques par les agriculteurs. Un premier travail d'analyse d'évolution des usages de pesticides au sein de régions agricoles dont les cultures sont homogènes sera réalisé pour établir des associations pesticides – période – culture pour la période 2013-2022. Dans un deuxième temps, il faudra effectuer une jointure entre les données actuelles issues de la BNV-D et les pratiques anciennes pour lesquelles des données ont été acquises sur ces zones homogènes.

Un second travail portera sur l'identification de l'évolution des pratiques phytosanitaires majoritaires déjà recensées depuis 1970 pour des régions les mieux renseignées comme en Île-de-France ou la Marne par exemple. Cet effort de rapprochement entre usages phytosanitaires récents et pratiques agricoles permettra ensuite d'intégrer ces nouvelles informations au sein de base ArSeine.

Un troisième volet concernera la poursuite des développements au sein de la plateforme PyNuts – Riverstrahler afin d'implémenter les formalismes requis pour décrire le transfert des pesticides dans les milieux aquatiques. Ce travail pourra être décomposé en plusieurs étapes :

- Utilisation des observations issues de Naïades et d'ADES pour construire certaines données de forçage requises pour la modélisation
- Dresser un pattern de comportement des substances identifiées dans la typologie des molécules réalisée en phase 8 du PIREN-Seine
- Tester des scénarios alternatifs à l'échelle du bassin de la Seine, notamment l'effet d'interdiction de traitements, la substitution de molécules, la réduction de doses

Co-financement :

Projet CNRS EXHECO (2020 2021).



6. Transfert de connaissances

BLOC 6.1. La cellule de transfert des connaissances

Depuis 2016, le transfert des connaissances produites par les différentes actions de recherche du programme PIREN-Seine est coordonné par une cellule dédiée, animée par l'association ARCEAU Île-de-France en lien avec l'équipe de direction du PIREN-Seine. Les actions de cette cellule de transfert des connaissances visent à diffuser largement les résultats produits auprès d'un public large et toujours plus diversifié, dans le cadre d'un processus de co-construction auxquels les partenaires opérationnels et académiques sont étroitement associés.

Productions écrites

Au cours de la phase 9 du programme PIREN-Seine, la cellule de transfert des connaissances assurera la coordination de la rédaction et de l'édition de plusieurs formats qui ont rencontré un vif succès depuis leur implémentation, notamment les fiches 4-pages, les fiches-outil et les fascicules. Plusieurs thématiques potentielles ont d'ores et déjà été identifiées, et la cellule transfert reste ouverte à des suggestions de la part des partenaires en cours de phase 9.

- **La collection « Les fascicules du PIREN-Seine »**, dont l'accueil est très positif auprès des partenaires et du public professionnel ou universitaire (y compris auprès des étudiants comme support pédagogique), sera maintenue à un rythme d'une publication par an. Les chercheurs du PIREN-Seine et les partenaires seront consultés pour identifier la thématique centrale du fascicule produit en phase 9, en identifiant d'ores et déjà quelques points clés issus des travaux de l'axe 2. Les acteurs du bassin seront également sollicités pour participer aux réflexions autour de ce fascicule.
- **Les fiches 4-pages**, format initié en phase 7 et poursuivi en phase 8, seront également maintenues en phase 9. Les récentes évolutions ont incité la cellule transfert à proposer d'éditer ces documents en format 100 % numérique afin d'assurer une diffusion encore plus large auprès du public. Comme pour la phase précédente, les thématiques des fiches seront choisies sur proposition des partenaires, en fonction de leurs attentes et besoins. Une première fiche 4-page sera éditée en 2025 pour présenter les principales orientations scientifiques de la phase 9.
- **Les fiches-outil** sont un nouveau format introduit lors de la phase 8 du PIREN-Seine. Se présentant sous un format entièrement numérique sous la forme d'une fiche de 2 pages, ces productions visent à présenter un « outil » spécifique mobilisé par les chercheurs du PIREN-Seine dans le cadre de leurs travaux. Ainsi, en phase 8, deux fiches-outil sur le modèle CaWaQS, élément essentiel à la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin de la Seine, et sur le modèle pyNuts-Riverstrahler, assurant la modélisation des flux

biogéochimiques dans le bassin, ont été éditées. La cellule transfert propose d'éditer une fiche-outil par an en phase 9.

- La phase 9 sera également l'occasion pour la cellule transfert de reprendre l'édition de **posters**, ce qui permettra de renouveler ces objets de communication souvent déployés par le programme lors d'événements de type colloque. La cellule transfert propose d'ores et déjà de réaliser au moins trois posters sur la phase 9 : le premier, entièrement numérique, présentera l'organigramme de la phase 9 (identification des axes, blocs, actions et porteurs associés) ; les deux autres porteront sur « Le bassin de la Seine en chiffres clés » et « L'évolution des normes et usages en Seine ».
- Enfin, la cellule transfert poursuivra bien évidemment son rôle dans la relecture et la mise en ligne des **rapports d'activité annuels** et des **rapports de synthèse de fin de phase**, en lien avec la direction scientifique du programme.

Site web, médiathèque et développements numériques

La cellule transfert assure la mise en ligne et la disponibilité de l'ensemble des productions du PIREN-Seine sur le site internet du programme (www.piren-seine.fr), lequel a connu une refonte en phase 8 avec des réactions très positives de la part des partenaires opérationnels du programme. Le site web continuera à mettre à disposition, comme en phase 8, les éléments graphiques associés au programme (incluant leur remise à jour pour la phase 9) et assurera la diffusion des actualités du programme, y compris les bilans des événements comme les journées scientifiques et les colloques annuels. La cellule transfert assurera la gestion du site web ainsi que de la médiathèque du programme, qui s'est avérée être un outil incontournable de support iconographique.

Depuis 2018, le site internet du programme existe également en version anglophone (<https://www.piren-seine.fr/en>). Vitrine internationale du PIREN-Seine, ce site a pour vocation de présenter les travaux du programme qui sont directement édités en anglais, ainsi que les productions francophones traduites. La cellule transfert poursuivra son travail d'alimentation en contenu de ce site, en supervisant la traduction des contenus en français ayant une portée internationale et en assurant la mise en ligne des productions anglophones du programme.

La cellule transfert poursuivra également son développement numérique en travaillant à la réalisation de frises numériques. Ce nouveau format, initié en phase 8 avec le développement d'une frise retraçant l'histoire du PIREN-Seine, a rencontré un vif succès et sera donc enrichi en phase 9 de quatre nouvelles frises :

- la première frise portera sur les travaux de scénarisation agri-alimentaires et urbains conduits en phase 8,
- la deuxième frise portera sur les travaux de régionalisation des scénarios climatiques proposés par le GIEC à l'échelle du bassin de la Seine,
- la troisième frise se focalisera sur les études sociohistoriques sur les normes de qualité de l'eau et les usages associés
- enfin, la quatrième frise portera sur les couplages entre scénarios et modèles dans le cadre des travaux prévus dans les axes 1 et 2 de la phase 9 (scénarios d'irrigation maraichère par exemple).

Productions audio

Depuis les débuts du programme PIREN-Seine et jusqu'à la phase 8, les principales productions du PIREN-Seine se sont présentées sous forme écrite (rapports annuels et de synthèse, fiches 4-pages et fiches-outil, fascicules, ouvrages, etc.) ou sur la base de supports visuels (posters, etc.). Au cours de la



phase 9, la cellule transfert propose d'explorer un nouveau territoire en termes de valorisation et de diffusion des connaissances, en travaillant à l'élaboration de « pastilles sonores ». Ces dernières, d'une durée d'une vingtaine de minutes chacune, se présenteront sous la forme d'entretiens enregistrés avec un ou plusieurs chercheurs du programme sur une thématique donnée. Tout comme pour les productions écrites, les sujets de ces pastilles sonores seront élaborés en concertation avec les partenaires opérationnels et académiques du PIREN-Seine.

La cellule transfert propose de réaliser une dizaine de pastilles sonores au cours de la phase 9. Les discussions autour du contenu et des modalités d'enregistrement de ces pastilles auront lieu dès la première année de la phase 9, en 2025, pour un enregistrement prévu en milieu de phase et une diffusion prévue à la fin de la phase 9. Pour réaliser ces pastilles et garantir le succès de ce nouveau format, la cellule transfert s'appuiera sur le soutien matériel apporté par plusieurs partenaires académiques, dont le service « Capsule » de Sorbonne Université ainsi que les services équivalents de Mines Paris PSL et l'École des Ponts.

Interventions dans les territoires

La diffusion des savoirs passant par le développement d'un réseau de relais d'informations sur tout le bassin de la Seine, la cellule transfert renforcera sa présence et sa participation dans les événements organisés par les différents acteurs du bassin. Cet investissement permettra d'une part de représenter les scientifiques du programme dans des instances locales, et d'autre part de faire remonter des informations depuis les territoires vers les équipes de recherche. La présence de la cellule transfert dans les ateliers et événements répond ainsi à une demande des organismes partenaires d'apporter un relai de l'expertise scientifique dans les territoires, et d'être ainsi moteur dans l'aide à la prise de décision des acteurs du bassin. En outre, elle permettra de faire connaître le PIREN-Seine et ses actions de recherche au-delà de ses interlocuteurs actuels et d'inciter toutes les structures concernées par la gestion de l'eau et de l'environnement à s'approprier les ressources mises à dispositions par le programme, notamment à travers son site web. À cet effet, la cellule transfert travaillera à l'élaboration d'un nouveau support de présentation, centré sur les évolutions des normes et usages de l'eau dans le bassin de la Seine, qui viendra compléter les éléments d'ores et déjà disponibles sur le futur de la ressource en eau dans le bassin de la Seine.

La cellule transfert, comme en phase 7 et 8 du programme, sera également chargée de l'organisation et de l'animation des ateliers de co-réflexion du programme, à raison d'un atelier par an. Ces moments d'échange et de co-construction des actions de recherche entre partenaires et équipes de recherche seront organisés selon les attentes des gestionnaires et le degré de l'avancée des recherches menées dans les domaines concernés. Ces ateliers, aujourd'hui généralement organisés à Paris dans les laboratoires de recherche, pourront également être tenus au sein des structures partenaires et être l'occasion de journées de visite de certains ouvrages et participer ainsi à renforcer les liens entre chercheurs et gestionnaires du bassin. Par ailleurs, en phase 9, la cellule transfert participera également à l'animation d'un séminaire de lancement de la phase 9 prévu début 2025, et accompagnera les chercheurs pour l'organisation des ateliers liés aux actions autour de la *data visualization*, ainsi que les activités liées au collectif acteurs-chercheurs de la Bassée.

La cellule transfert pourra également être mobilisée à la suite de sollicitations ponctuelles pouvant survenir au cours de la phase 9. Ainsi, la participation de la cellule transfert au projet interacadémique porté par la DRIEAT, par ailleurs partenaire opérationnel du PIREN-Seine, intitulé « L'eau pour tous, tous pour l'eau ! », a permis à la cellule transfert de diversifier ses modalités d'intervention auprès des territoires tout en élargissant son audience à un public scolaire. D'autres interventions de ce type pourront être envisagées lors de la phase 9 afin de renforcer les liens entre les chercheurs, les acteurs du territoire et le grand public.

Enfin, la cellule transfert du PIREN-Seine participera à une diffusion des savoirs à l'échelle du bassin, en cohésion avec les autres programmes composant la Zone Atelier Seine du CNRS (GIP Seine-Aval et

OPUR). Ce travail commun prendra la forme d'échanges réguliers autour de thématiques transversales, du transfert des documents de valorisation d'un programme à l'autre, et de la poursuite de l'engagement actuel à mettre en place et enrichir un site web dédié à la communication de la ZA Seine.

Autres activités de la cellule transfert

La phase 9 verra également le maintien des autres activités déjà prises en charge à ce jour par la cellule transfert. Ce sera le cas de l'organisation du colloque annuel du PIREN-Seine et des journées scientifiques mises en place en phase 8, dont la prise en charge logistique est assurée par la cellule, ainsi que sa participation à l'élaboration du programme, la couverture photographique de ces événements et la mise en ligne des bilans. La mise en place en phase 8 de la mini-régie permettant une organisation des événements en hybride « présentiel/distanciel » a été un avancement majeur pour la diffusion des connaissances, et cette ressource continuera d'être fortement mobilisée en phase 9, notamment pour les journées scientifiques.

La cellule transfert couvre également certains événements particuliers impliquant les chercheurs du programme, tels que des ateliers pédagogiques, des journées d'expérimentation sur le terrain, des événements sciences-société, ou des rencontres avec les journalistes. Cet accompagnement permet aux chercheurs de s'appuyer sur la cellule transfert pour obtenir des ressources audiovisuelles, photographiques, et infographiques pertinentes pour les publics concernés, et d'assurer si besoin le relai de l'information sur le site du programme.

Ce relai d'information étant au cœur de la mission de la cellule transfert, elle continuera d'assurer pendant la phase 8 la rédaction, la mise en ligne et la diffusion de la newsletter du programme. La fréquence de 2 à 3 parutions par an demeure aujourd'hui la plus pertinente au vu du rythme de production des documents, des actualités médiatiques et du calendrier des scientifiques du programme, et sera maintenue en l'état. La cellule transfert continuera également de diffuser en interne, en externe et vers les partenaires les informations sur la vie du programme, à travers les listes de diffusion adéquates.

Enfin, la phase 9 sera l'occasion pour la cellule transfert de poursuivre le développement de la stratégie autour de la présence du PIREN-Seine sur les réseaux sociaux, permettant de communiquer des informations pertinentes liées aux points forts de la vie du programme, notamment les événements de type colloque et journée scientifique et la parution de nouvelles productions écrites.

BLOC 6.2. Des données partagées et accessibles

6.2.1 Science ouverte au PIREN-Seine

Fin 2020, le PIREN-Seine s'est doté d'une cellule Données et le programme a depuis affiché sa volonté d'ouvrir les codes et les données issus de ses recherches. Il s'inscrit ainsi dans la dynamique nationale et internationale en faveur de la Science ouverte. Les premiers travaux ont abouti à la mise en place d'un géocatalogue de métadonnées (<https://data.za-seine.fr>), l'ouverture de l'entrepôt de données PIREN-Seine au sein de data InDoRES (<https://data.indores.fr/dataverse/PIREN-Seine>), l'organisation d'ateliers et d'une première *metadata-party* ainsi que l'ébauche d'un « Schéma stratégique de gestion des données » du programme.



Les objectifs de la cellule données en phase 9 se concentreront en premier lieu sur l'appropriation par les équipes de recherche du PIREN-Seine des outils mis en place en phase 8. Si les démarches ont été engagées, elles sont restées timides et limitées par la faible disponibilité des personnes porteuses de cette action. Or, l'appropriation des outils nécessite un travail important d'animation et d'acculturation des équipes aux enjeux de la Science ouverte. L'idée est de créer différents supports comme des fiches synthétiques et de les décliner avec des exemples types. En parallèle, des ateliers courts (en présentiel ou en ligne) seront organisés pour assurer un accompagnement en petits groupes. Ces animations devraient permettre un enrichissement du portail de métadonnées et de l'entrepôt de données Data InDoRES PIREN-Seine. Ils seront également des lieux d'échanges propices à une évaluation des outils proposés afin d'envisager leur évolution.

À noter que le portail de métadonnées sera migré depuis son hébergement externe vers le catalogue centralisé InDoRES (cat.indores.fr) ce qui permettra notamment une meilleure intégration au sein des outils du Réseau des Zones Ateliers CNRS.

En complément, un important travail consistera à identifier les jeux de données et codes sources à référencer en ciblant dans un premier temps les publications PIREN-Seine les plus récentes. Ce travail se fera en collaboration avec les auteurs concernés et les amènera à être autonomes sur le dépôt de fiches de métadonnées et de jeux de données/code source.

Un autre objectif majeur concernera la rédaction du Schéma stratégique de gestion des données du programme. Cela se fera en concertation avec, d'une part, les membres du comité de direction du PIREN-Seine et, d'autre part, la direction de la Zone Atelier Seine avec laquelle les portails de métadonnées et données sont mutualisés.

Par ailleurs, la cellule Donnée continuera à intervenir en support de la cellule Transfert sur la gestion et la génération des DOI attribués aux productions du PIREN-Seine.

Les deux premières années de fonctionnement seront consacrées à la mise en place des animations avec l'organisation des ateliers courts. En amont du premier atelier, il s'agira de créer les premiers supports de type fiches synthétiques. De premiers ateliers, ressortiront sans doute des besoins d'adaptation des outils qui pourront faire l'objet de discussions au sein du groupe de travail dédié du Réseau des Zones Ateliers.

La migration du catalogue de métadonnées sera faite dès la première année. En parallèle, les données géographiques seront déposées individuellement sur l'entrepôt de données InDoRES. Ce travail bénéficiera du soutien du gestionnaire de données recruté au sein du Réseau des Zones Ateliers.

La reprise de la rédaction du Schéma stratégique de gestion des données du PIREN-Seine occupera également les travaux des premières années.

Par ailleurs, une réflexion sera menée avec la cellule Transfert afin d'aboutir à une meilleure mise en valeur des portails d'accès aux métadonnées et aux données depuis le site web du PIREN-Seine.

6.2.2 Vers des approches de *Data visualization*

Si la 8^{ème} phase du PIREN-Seine a permis d'entamer une clarification des éléments de discours attendant à l'assemblage des modèles sur le continuum Homme — Terre — Mer (HTM) de la Seine, un effort d'accompagnement reste une condition *sine qua non* pour qu'une co-construction réellement « équitable » puisse se mettre en place entre chercheurs et partenaires.

Cette action propose de mettre en place des « démonstrateurs » permettant aux partenaires et gestionnaires de s'approprier les résultats de simulations produits sur des territoires/compartiments spécifiques du continuum HTM de la Seine. La co-visualisation, ne portera pas que sur la simple comparaison entre résultats de simulations et observations disponibles, mais intégrera la visualisation des différents leviers d'actions (tous spatialement explicites) pour une meilleure appropriation territoriale des résultats de simulation par les gestionnaires.

L'action Data CoViz répond à une demande clairement formulée par les partenaires opérationnels et les autres équipes de recherche du PIREN-Seine. Elle a notamment émergé à plusieurs reprises lors des ateliers de co-réflexion centrés sur les enjeux liés aux données organisés lors de la phase 8, et les ateliers de co-construction de la phase 9. En effet, s'il est indispensable d'ouvrir les codes des modèles et les jeux de données produits au sein du PIREN-Seine via des entrepôts pour répondre aux enjeux de la Science ouverte, l'utilisation de ces informations reste souvent limitée à des publics disposant de compétences techniques avancées. En outre, ces dépôts ne permettent pas de confrontation directe avec des données observées, ou toutes autres informations pertinentes pour interpréter, contextualiser et territorialiser les résultats de modélisation.

L'objectif de cette action est donc de développer et de rendre accessible des démonstrateurs permettant aux publics non experts en modélisation d'explorer les données issues des résultats de modélisation et de les confronter aux données d'observation ainsi qu'à d'autres jeux de données pertinents.

L'action se base sur de solides acquis. En effet, plusieurs initiatives ont été prises par les équipes concernées pour mettre au point des interfaces de visualisation propres à leurs outils de modélisation. Ainsi, l'équipe du modèle pyNuts-Riverstrahler a récemment développé un « *dash board* », pyCodon (<https://gitlab.in2p3.fr/rive/tools/pycodon>), pour l'analyse des simulations produites. De la même manière, pour le modèle CaWaQS, il existe un outil de visualisation développé sous la forme d'extension au logiciel SIG QGIS.

Les travaux prévus dans la phase 9 visent à reprendre les outils développés en interne en intégrant les partenaires du PIREN-Seine au processus de développement via l'organisation d'ateliers de co-construction. Ils seront notamment sollicités pour définir leur besoin en termes d'agrégation spatiale et temporelle des variables ainsi que de calcul d'indicateurs environnementaux.

L'équipe porteuse du modèle pyNuts-Riverstrahler se base par ailleurs sur un système d'information sur l'eau, **DoNuts**, permettant la bancarisation d'observations de type ponctuelles et, pour les données concernant les rivières, leur mise en relation à des réseaux hydrographiques de référence, utilisés en modélisation. Le choix technologique fait pour DoNuts, PostgreSQL/postGIS avec une architecture client-serveur, rend ce système d'information directement exploitable par une application web. DoNuts est par ailleurs conçu de telle sorte que l'intégration de nouvelles données (nouvelles variables et mises à jour) issues des référentiels nationaux (Naïades ou ADES par exemple pour la France) est aisée.

Les étapes de travail envisagées sont les suivantes :

- Pour chacun des modèles (pyNuts-Riverstrahler et CaWaQS), choix des simulations à présenter (simulations de référence en temps présent, exploration de scénarios),
- Développement et choix d'indicateurs à présenter à partir des résultats de simulation et structuration en base de données,
- Consolidation de la base de données d'observation : ajout de nouvelles variables (pesticides, eaux souterraines, etc.) et mise à jour de l'existant,
- Sélection des jeux de données complémentaires et pertinents (localisation des stations d'épuration, occupation du sol, prises d'eau, etc.),
- Choix d'une solution d'hébergement des bases de données. Cette étape inclura l'étude des solutions suivantes : l'unité de service Sacado de Sorbonne Université, le mésocentre ESPRI de l'IPSL,
- Développement et hébergement d'une interface de co-visualisation de données (graphiques, cartographies). Le travail est envisagé avec l'appui de l'unité Summit de Sorbonne Université qui propose de mettre à disposition du temps ingénieur.

Les premiers développements sont prévus sur l'outil de visualisation associé au modèle pyNuts-Riverstrahler en travaillant sur les étapes décrites précédemment. Un premier atelier de co-



construction avec les partenaires sera proposé en 2025. L'objectif est d'aboutir à une première version de l'outil en fin d'année 2025 et de l'ouvrir en test aux partenaires les plus impliqués. Les premiers retours permettront de relancer un cycle de développement en 2026.

Dès la première année, le travail de migration des bases depuis des serveurs internes à METIS vers une solution externalisée sera entrepris. En effet, actuellement hébergées par le service informatique de METIS, la base de données DoNuts et les bases de modélisation ne sont accessibles qu'aux équipes de recherche localisées à METIS. En outre, l'unité ne disposant plus des ressources humaines requises pour assurer l'hébergement et la maintenance des serveurs, il est indispensable d'externaliser ces bases.





Une méthodologie

Expérimentation

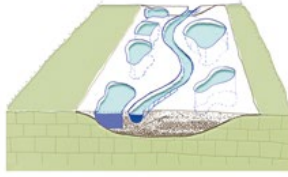
Terrain



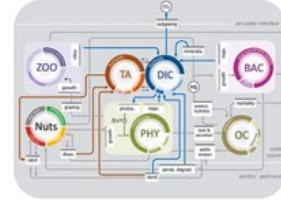
Laboratoire



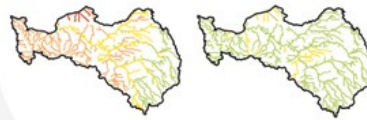
Reconstitution



Modélisation



Scénarisation



SCIENTIFIQUES



PARTENAIRES

7. Références

- Aissa-Grouz, N., Garnier, J., Billen, G., 2018. Long trend reduction of phosphorus wastewater loading in the Seine: determination of phosphorus speciation and sorption for modeling algal growth. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 23515–23528.
- Amorim, J., et al. (2019). *Science of the Total Environment*, 669, 11-28.
- Ardo, S.G., Néliu, S., Ona-Nguema, G., Delarue, G., Brest, J., Elsa, P., Morin, G., 2015. Oxidative Degradation of Nalidixic Acid by Nanomagnetite via Fe₂+O₂-Mediated Reactions. *Environ. Sci. Technol.* 49, 4506–4514.
- Aubertheau E. et al. *Science of the Total Environment* 579 (2017) 1387-1398
- Ayrault et al., 2012, *Chemosphere* 87, 902–910
- Baratelli, F., Garnier, J., Parlanti, E., Varrault, G., Goffin, A., Musabimana, N., Rocher, V., Hayet, Z., Mercier, B., Martinez, A., Nespoulet, R., Sourzac, M., Flipo, N. Caractéristiques de la matière organique dissoute dans le bassin de la Seine. Dans Flipo, N. (ed), *Métabolisme des eaux du bassin de la Seine au regard de la matière organique, PIREN-Seine, Rapport de synthèse phase VIII, Volume 5, 2023a*, pp. 7-30
- Baratelli, F., Huguet, A., Parlanti, E., et al. Caractérisation de l'état de contamination de l'axe Seine. Dans Baratelli, F., Thiebault, T. (eds), *Dynamique des contaminants à l'échelle du bassin versant de la Seine, PIREN-Seine, Rapport de synthèse phase VIII, Volume 9, 2023 b*, pp. 37-140.
- Baratelli, F., Parlanti, E., Varrault, G., Sourzac, M., Mouchel, J.-M., Mohamed, S., Jost A., Guillon S., R.A., Flipo, N., 2017. Caractérisation hydro-géochimique de la plaine de la {B}assée en période de crue.
- Barjhoux, I., Anschutz, P., Anzil, A., Autret, A., Ayrault, S., Berthe, T., Bimbot, M., Bordier, L., Budzinski, H., Cachot, J., Charroni, L., Chaumot, A., Clérandeau, C., Corzani-Euzebe, G., Dedourge-Geffard, O., Faburé, J., Fechner, L., Francois, A., Geffard, O., George, I., Huteau, V., Jaffal, A., Labadie, P., Landi, L., Lebrun, J., Levi, Y., Munoz, G., Noury, P., Oziol, L., Peluhet, L., Petit, F., Poirier, D., Quéau, H., Servais, P., Uher, E., Urien, N., Geffard, A., 2016. Approche intégrée pour l'évaluation de la qualité de l'axe Seine.
- Barles, S., 2017. Écologie territoriale et métabolisme urbain : quelques enjeux de la transition socio-écologique. *Rev. d'économie régionale urbaine* 5, 819–836.
- Bass, L. et al. (1999). *Antimicrobial Agents and Chemotherapy* 43, 2925–2929
- Berg, A., Findell, K., Lintner, B., Giannini, A., Seneviratne, S., Hurk, B., Lorenz, R., Pitman, A., Hagemann, S., Meier, A., Cheruy, F., Ducharne, A., Malyshev, S., Milly, P., 2016. Land-atmosphere feedbacks amplify aridity increase over land under global warming. *Nat. Clim. Chang.* 6, 869–874.
- Billen, G., Garnier, J., Hanset, P., 1994. Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: the RIVERSTRAHLER Model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia* 289, 119–137.
- Billen, G., Garnier, J., Thieu, V., Silvestre, M., Barles, S., Chatzimpiros, P., 2012. Localising the nitrogen imprint of the Paris food supply: the potential of organic farming and changes in human diet. *Biogeosciences* 9, 607–616.
- Billen, G., Le Noë, J., Garnier, J., 2018. Two contrasted future scenarios for the French agro-food system. *Sci. Total Environ.* 637–638, 695–705.
- Blanchoud, H., Tallec, G., Desportes, A., Ansart, P., 2018. Suivi à long terme des pesticides pour la compréhension de leurs processus de transfert à l'échelle du bassin versant.
- Boé, J., Habets, F., 2014. Multi-decadal river flow variations in France. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 691–708.
- Boé, J., Radojevic, M., Bonnet, R., Dayon, G., 2018. Scénarios sécheresse sur le bassin Seine-Normandie.
- Bognon, S., 2014. Les transformations de l'approvisionnement alimentaire dans la métropole parisienne. Trajectoire socio-écologique et construction de proximités. Univ. Paris I.
- Bonnet R, Boé J, Habets F (2020) Influence of multidecadal variability on high and low flows: the case of the Seine basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 24:1611–1631. <https://doi.org/10.5194/hess-24-1611-2020>
- Bonnet, R., Boé, J., Dayon, G., Martin, E., 2017. Twentieth-Century Hydrometeorological Reconstructions to Study the Multidecadal Variations of the Water Cycle Over France. *Water Resour. Res.* 53, 8366–8382.
- Botta F. et al. (2009) *Chemosphere*, 77, 133-139.
- Caesar, L., Rahmstorf, S., Robinson, A., Feulner, G., Saba, V., 2018. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature* 556, 191–196.
- Campoy, A., Ducharne, A., Cheruy, F., Hourdin, F., Polcher, J., Dupont, J.C., 2013. Response of land surface fluxes and precipitation to different soil bottom hydrological conditions in a general circulation model. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 10–725.
- Chen et al. *Chemical Engineering Journal* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.160>.
- Cheng et al. *Environ. Sci. Technol.* 2020, 54, 4091–4101.
- Cladière, M., Bonhomme, C., Vilmin, L., Gasperi, J., Flipo, N., Habets, F., Tassin, B., 2014a. Modelling the fate of nonylphenolic compounds in the Seine River - part 2: assessing the impact of global change on daily concentrations. *Sci. Total Environ.* 468–469, 1059–1068.
- Cladière, M., Bonhomme, C., Vilmin, L., Gasperi, J., Flipo, N., Tassin, B., 2014 b. Modelling the fate of nonylphenolic compounds in the Seine River - part 1: determination of in-situ biodegradation rate constants. *Sci. Total Environ.* 468–469, 1050–1058.

- Colin et al., 2021, *Microbial Ecology*, 10.1007/s 00248-020-01650-2
- Cucchi, K., Rivière, A., Baudin, A., Robin, Y. and Flipo, N. (2019) – Estimation des échanges nappe-rivière locaux et de leur variation le long d'un réseau hydrographique : Développement d'un capteur innovant et application au bassin agricole des Avenelles, Rapports d'activité, PIREN-Seine (PIREN2019h).
- Dangeard, M., Bodet, L., Rivière, A., Schneider, S., Guérin, R., Jougnot, D. and Maineult, A. (2019) – Amélioration de la quantification des échanges nappe-rivière grâce aux « time-lapse » sismiques, Rapports d'activité, PIREN-Seine (PIREN2019c).
- Dangeard, M., Schneider, S., Bodet, L., Rivière, A., Guérin, R., Réjiba, F., and Hovhannissian, G. (2017) – Vers une interpolation hydrogéophysique des propriétés hydrodynamiques de la subsurface : apports du « time-lapse » sismique. Rapport d'activité, PIREN-Seine. (PIREN2017b).
- Dayon, G., Boé, J., Martin, E., Gailhard, J., 2018. Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties. *Comptes Rendus - Geosci.* 350, 141–153.
- Denet E et al.. 2017. *Parasitol Res.* doi: 10.1007/s00436-017-5632-6.
- Denet E, et al. 2018. *PLoS One.* doi : 10.1371/journal.pone.0192308.
- Denet E et la. 2020. *Environ Microbiol Rep.* doi : 10.1111/1758-2229.12884.
- Devaux, J., Heller, A., 2018. L'Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (EFESE) -- Les milieux humides et aquatiques continentaux.
- Dinh QT et al. 2017a. *Chemosphere* <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.106>
- Dinh Q, et al. 2017b. *Sci Total Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.118>.
- Drapier L., Germaine M.-A., Lespez L., 2023, The role of hydrosocial heritages produced by hydrosocial territories in understanding environmental conflicts : The case of the Sélune dam removals (France), *Environment and planning E : Nature and Space*.
- Du et al. *Science of The Total Environment* 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145059>.
- Du et al. *Water Research* 2021b, 202, 117442.
- Esculier, F., Le Noë, J., Barles, S., Billen, G., Créno, B., Garnier, J., Lesavre, J., Petit, L., Tabuchi, J.-P., n.d. The biogeochemical imprint of human metabolism in Paris Megacity: A regionalized analysis of a water-agro-food system. *J. Hydrol.*
- Even, S., Mouchel, J.-M., Servais, P., Flipo, N., Poulin, M., Blanc, S., Chabanel, M., Paffoni, C., 2007. Modeling the impacts of Combined Sewer Overflows on the river Seine water quality. *Sci. Total Environ.* 375, 140–151.
- Even, S., Poulin, M., Garnier, J., Billen, G., Servais, P., Chesterikoff, A., Coste, M., 1998. River ecosystem modelling: Application of the ProSe model to the Seine river (France). *Hydrobiologia* 373, 27–37.
- Fang et al. *J. Hazard. Mater.* 2013, 250, 68–75.
- Feliks, Y., Ghil, M., Robertson, A.W., 2011. The atmospheric circulation over the North Atlantic as induced by the SST field. *J. Clim.* 24, 522–542.
- Filleul, L., Gallay, A., M., L., 2017. La leptospirose dans les régions et les départements français d'outre-mer. *Santé Publique Fr. Bull. Epidémiologique Hebd.* 8–9, 129–175.
- Finco, C., Rejiba, F., Schamper, C., Cavalcante Fraga, L.H., Wang, A., 2023. Calibration of near-surface multi-frequency electromagnetic induction data, *Geophysical Prospecting* 71(4), 765-779. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.13344>
- Flipo, N., Baratelli, F., Parlanti, E., Guillon, S., Varrault, G., Jost, A., Sourzac, M., Rivière, A., Mouchel, J.-M., 2018. Caractérisation hydro-géochimique d'une plaine alluviale en période de crue : cas de la Bassée -- Hydro-geochemical characterization of an alluvial plain during flood: case study of la {B}assée. In: *Proceedings of IS. Rivers* 2018. pp. 1–4.
- Flipo, N., Even, S., Poulin, M., Tusseau-Vuillemin, M.-H., Améziane, T., Dauta, A., 2004. Biogeochemical Modelling at the River Scale: Plankton and Periphyton Dynamics - Grand Morin case study, France. *Ecol. Model.* 176, 333–347.
- Flipo N, Gallois N, Schuite J (2023) Regional coupled surface–subsurface hydrological model fitting based on a spatially distributed minimalist reduction of frequency domain discharge data. *Geoscientific Model Development* 16:353–381. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-353-2023>
- Flipo, N., Labarthe, B., Pryet, A., Baratelli, F., Goblet, P., Akopian, M., 2016. Echanges nappe-rivière à l'échelle du bassin de la Seine.
- Flipo, N., Mouhri, A., Labarthe, B., Biancamaria, S., Rivière, A., Weill, P., 2014. Continental hydrosystem modelling : the concept of nested stream-aquifer interfaces. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 3121–3149.
- Floury, P., Gaillardet, J., Gayer, E., Bouchez, J., Tallec, G., Ansart, P., Koch, F., Gorge, C., Blanchouin, A., Roubaty, J.-L., 2017. The potamochemical symphony: New progress in the high-frequency acquisition of stream chemical data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 6153–6165.
- Froger et al., 2018, *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 28667-28681
- Froger et al., 2019, *Chemosphere*, 219, 1002-1013
- Froger et al., 2020, *Journal of Soils and Sediments*, 20, 4055–4069
- Gaillardet, J., Braud, I., Hankard, F., Anquetin, S., Bour, O., Dorfliger, N., de Dreuzy, J.R., Galle, S., Galy, C., Gogo, S., Gourcy, L., Habets, F., Laggoun, F., Longuevergne, L., Borgne, T. Le, Naaim-Bouvet, F., Nord, G., Simonneaux, V., Six, D., Tallec, T., Valentin, C., Abril, G.,

- Allemand, P., Arènes, A., Arfib, B., Arnaud, L., Arnaud, N., Arnaud, P., Audry, S., Comte, V.B., Batiot, C., Battais, A., Bellot, H., Bernard, E., Bertrand, C., Bessière, H., Binet, S., Bodin, J., Bodin, X., Boithias, L., Bouchez, J., Boudevillain, B., Moussa, I.B., Branger, F., Braun, J.J., Brunet, P., Caceres, B., Calmels, D., Cappelaere, B., Celle-Jeanton, H., Chabaux, F., Chalikhakis, K., Champollion, C., Copard, Y., Cotel, C., Davy, P., Deline, P., Delrieu, G., Demarty, J., Dessert, C., Dumont, M., Emblanch, C., Ezzahar, J., Estèves, M., Favier, V., Faucheux, M., Filizola, N., Flammarion, P., Floury, P., Fovet, O., Fournier, M., Francez, A.J., Gandois, L., Gascuel, C., Gayer, E., Genthon, C., Gérard, M.F., Gilbert, D., Gouttevin, I., Grippa, M., Gruau, G., Jardani, A., Jeanneau, L., Join, J.L., Jourde, H., Karbou, F., Labat, D., Lagadeuc, Y., Lajeunesse, E., Lastennet, R., Lavado, W., Lawin, E., Lebel, T., Bouteiller, C. Le, Legout, C., Lejeune, Y., Meur, E. Le, Moigne, N. Le, Lions, J., Lucas, A., Malet, J.P., Marais-Sicre, C., Maréchal, J.C., Marlin, C., Martin, P., Martins, J., Martinez, J.M., Massei, N., Mauclerc, A., Mazzilli, N., Molénat, J., Moreira-Turcq, P., Mougou, E., Morin, S., Ngoupayou, J.N., Panthou, G., Peugeot, C., Picard, G., Pierret, M.C., Porel, G., Probst, A., Probst, J.L., Rabatel, A., Raclot, D., Ravanel, L., Rejiba, F., René, P., Ribolzi, O., Riotte, J., Rivière, A., Robain, H., Ruiz, L., Sanchez-Perez, J.M., Santini, W., Sauvage, S., Schoeneich, P., Seidel, J.L., Sekhar, M., Sengtaheuanghoung, O., Silvera, N., Steinmann, M., Soruco, A., Tallec, G., Thibert, E., Lao, D. V, Vincent, C., Viville, D., Wagnon, P., and R. Zitouna, 2018. OZCAR : the French network of Critical Zone Observatories. *Vadose Zo. J.* 17, 180 067.
- Gallois, N., Puech, T., Viennot, P., 2018. Modélisation des transferts de produits phytosanitaires vers les eaux souterraines : Cas de l'atrazine et de ses métabolites sur le bassin amont de la Vesle (Marne).
- Gallois, N., Viennot, P., 2018. Modélisation de la pollution diffuse d'origine agricole des grands aquifères du bassin Seine-Normandie : Actualisation des modélisations couplées STICS-MODCOU – Modélisation de scénarios agricoles sous changement climatique.
- Garnier, J., Anglade, J., Benoit, M., Billen, G., Puech, T., Ramarson, A., Passy, P., Silvestre, M., Lassaletta, L., Trommenschlager, J.-M., Schott, C., Tallec, G., 2016. Reconnecting crop and cattle farming to reduce nitrogen losses to river water of an intensive agricultural catchment (Seine basin, France): Past, present and future. *Environ. Sci. Policy* 63, 76–90.
- Garnier, J., Billen, G., Coste, M., 1995. Seasonal succession of diatoms and chlorophyceae in the drainage network of the river Seine: Observations and modelling. *Limnol. Ocean.* 40, 750–765.
- Garnier, J., Le Noë, J., Marescaux, A., Sanz-Cobena, A., Lassaletta, L., Silvestre, M., Thieu, V., Billen, G., 2019. Long-term changes in greenhouse gas emissions from French agriculture and livestock (1852–2014): From traditional agriculture to conventional intensive systems. *Sci. Total Environ.* 660, 1486–1501.
- Goffin, A., Guérin, S., Rocher, V., Varrault, G., 2017. Caractérisation de l'évolution de la matière organique dissoute de l'amont à l'aval de l'agglomération parisienne pendant une année hydrologique par spectrométrie de fluorescence 3D.
- Guerrin, J., Fernandez, S., Drapier, L., Serra-Llobet, A. et Roche, C., « Que font les solutions fondées sur la nature aux politiques de gestion des risques liés à l'eau ? », *Développement durable et territoires* [En ligne], Vol. 14, n° 2 | Octobre 2023, mis en ligne le 30 octobre 2023, consulté le 27 février 2024. URL : <http://journals.openedition.org/developpementdurable/22788> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.22788>
- Guillois Y Bourhy P, A.F.P.M.D.A.A.G.J.H.C.B.M.C.C.B.R.C.L.G.M.K.L.A.S.A., 2018. An outbreak of leptospirosis among kayakers in Brittany, North-West France, 2016. *Eurosurveillance* 23.
- Guillon, S., Jézéquel, D., Viollier, E., Groleau, A., 2018. Dynamique temporelle des flux de carbone dans une gravière de la Bassée.
- Guillon, S., Rivière, A., Flipo, N., 2017. Premiers retours sur la faisabilité du tracage des écoulements à l'aide des isotopes stables de l'eau et du radon.
- Haghe, J. P., Euzen, A., Servais, P., 2017. Baignade urbaine dans la Seine et la Marne : un indicateur de qualité des cours d'eau ? In: C, L.L.C. (Ed.), *Les Rivières Urbaines et Leur Pollution*. Editions Quae, pp. 61–78.
- He et al. *Environ. Sci. Technol.* 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03975>.
- Huang et al. *Applied Clay Science* 2020, 188, 105504.
- Huerta, B. et al. 2016. *Science of The Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.049>
- Huguet A., A. Thibault, C. Anquetil, S. Derenne, M. Sourzac, and E. Parlanti (2019). Approches combinées globales et moléculaires pour le suivi des caractéristiques de la matière organique dans le bassin de la Seine, dans Sources et dynamique de la matière organique dans le bassin de la Seine. Rapport PIREN-Seine de synthèse de phase VII, PIREN-Seine.
- Hulot et al en révision, Do macroinvertebrate abundance and community structure depend on the quality of ponds located in peri-urban areas? *PCI Ecotoxicology and Environmental Chemistry*. <https://doi.org/10.1101/2023.10.20.563281>
- Janda, J.M., and Abbott, S.L. 2021.. *Clin. Microbiol.* doi:10.1128/CMR.00174-20. PMID : 33 627 443.
- Jost, A., Wang, S., Labarthe, L., Flipo, N., 2017. Impacts hydrodynamiques des gravières dans la plaine alluviale de la {B}assée.
- Kilic D (2022) Modelling of water and energy fluxes in the Seine basin. Thèse de doctorat, Université Paris Sciences et Lettres
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., Prentice, I. C., 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochem. Cycles* 19, 1–33.
- Labadie, P., Simonnet-Laprade, C., Maciejewski, K., Lachaux, V., Le~Menach, K., Budzinski, H., Alliot, F., Chevreuil, M., Santos, R., Goutte, A., 2017. Transferts de micropolluants dans les réseaux trophiques lotiques : exemple de l'Orge.
- Labarthe, B., 2016. Quantification des échanges nappe-rivière au sein de l'hydrosystème {S}eine par modélisation multi-échelle. MINES ParisTech, {PSL} {R}esearch {U}niversity.
- Labarthe, B., Flipo, N., 2016a. Dynamique des échanges hydriques entre un réseau hydrographique, une plaine alluviale et leur aquifère régional.
- Labarthe, B., Flipo, N., 2016 b. Dynamique des échanges hydriques entre un réseau hydrographique, une plaine alluviale, et leur aquifère

- régional.
- Lamé, A., 2013. Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Le Gall et al., 2018, *Environmental Pollution* 240, 125-139
- Le Noë, J., Billen, G., Garnier, J., 2017. How the structure of agro-food systems shapes nitrogen, phosphorus, and carbon fluxes: The generalized representation of agro-food system applied at the regional scale in France. *Sci. Total Environ.* 586, 42–55.
- Le Pape et al., 2012, *Journal of Hydrology*, 472, 99-110
- Le Pape, P., Quantin, C., Morin, G., Jouvin, D., Kieffer, I., Proux, O., Ghanbaja, J., Ayrault, S., 2014. Zinc Speciation in the Suspended Particulate Matter of an Urban River (Orge, France): Influence of Seasonality and Urbanization Gradient. *Environ. Sci. Technol.* 48, 11901–11909.
- Le Pichon, C., Tales, E., Belliard, J., Torgersen, C.E., 2017. Spatially intensive sampling by electrofishing for assessing longitudinal discontinuities in fish distribution in a headwater stream. *Fish. Res.* 185, 90–101.
- Lee. *Environ. Eng. Res.* 2015, 20, 205-211.
- Liao et al. *Chemical Engineering Journal* 2019, 368, 700–709.
- Liu, J., Zhao, Z., Ding, Z., Fang, Z., Cui, F., 2016. Degradation of 4-chlorophenol in a Fenton-like system using Au-Fe-3O₄ magnetic nanocomposites as the heterogeneous catalyst at near neutral conditions. *RSC Adv.* 6, 53080–53088.
- Marchand, E. et al. *Environmental Toxicology and Chemistry* <https://doi.org/10.1002/etc.5810>
- Marescaux, A., 2018. Carbon Cycling across the human-impacted Seine River Basin: from the modelling of carbon dioxide outgassing to the assessment of greenhouse gas emissions. Sorbonne Université.
- Marescaux, A., Thieu, V., Borges, A. V., Garnier, J., 2018. Seasonal and spatial variability of the partial pressure of carbon dioxide in the human-impacted Seine River in France. *Sci. Rep.* 8, 13961.
- Marson P, Corre L, Soubeyroux J-M, et al (2024) Rapport de synthèse sur les projections climatiques régionalisées. In *Explore2 : Anticiper les évolutions climatiques et hydrologiques en France. Recherche Data Gouv*
- Massei, N., Dieppois, B., Hannah, D.M., Lavers, D. A., Fossa, M., Laignel, B., Debret, M., 2017. Multi-time-scale hydroclimate dynamics of a regional watershed and links to large-scale atmospheric circulation: Application to the Seine river catchment, France. *J. Hydrol.* 546, 262–275.
- Mignolet, C., Fèche, R., Schott, C., Barataud, F., 2018. Concevoir un système agri-alimentaire territorialisé en milieu rural : vers l'émergence d'un living-lab pour impulser de nouvelles pratiques agricoles et alimentaires à différentes échelles de territoire. *Agron. Environ. Sociétés* 8.
- Mohd Radi, M.F., Hashim, J.H., Jaafar, M.H., Hod, R., Ahmad, N., Nawi, M.A., Baloch, G.M., Ismail, R., Ayub, F.N.I., 2018. Leptospirosis Outbreak After the 2014 Major Flooding Event in Kelantan, Malaysia: A Spatial-Temporal Analysis. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 98, 1281–1295.
- Morin et al. *J. Phys. Chem. C* 2023a. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c02236>.
- Morin et al. Rapport de synthèse phase 8 PIREN-Seine 2023 b. https://www.piren-seine.fr/sites/default/files/piren_documents/rapports_de_phase_8/rapport_piren_ph8_vol10_processus_vf_0_0.pdf
- Morin, G., Bonnin, D., 1999. Modeling EPR powder spectra using numerical diagonalization of the spin hamiltonian. *J. Magn. Reson.* 136, 176–199.
- Mouchel, J.-M., Rocha, S., Rivière, A., Tallec, G., 2016. Caractérisation de la géochimie des interfaces nappe-rivière du bassin des Avenelles.
- Mouhri, A., Flipo, N., Rejiba, F., de Fouquet, C., Bodet, L., Goblet, P., Kurtulus, B., Ansart, P., Tallec, G., Durand, V., Jost, A., 2013. Designing a multi-scale sampling system of stream-aquifer interfaces in a sedimentary basin. *J. Hydrol.* 504, 194–206.
- Newcomer, M.E., Hubbard, S.S., Fleckenstein, J.H., Maier, U., Schmidt, C., Thullner, M., Ulrich, C., Flipo, N., Rubin, Y., 2018. Influence of hydrological perturbations and riverbed sediment characteristics on hyporheic zone respiration of CO₂ and N₂. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 123, 902–922.
- Ouattara, N.K., Passerat, J., Servais, P., 2011. Faecal contamination of water and sediment in the rivers of the Scheldt drainage network. *Environ. Model. Assess.* 183, 243–257.
- Page et al. *Environmental Science and Technology* 2013, 47, 12860-12867.
- Parlanti, E., M. Sourzac, F. Baratelli, G. Varrault, and N. Flipo (2019). Propriétés optiques de la matière organique dissoute (MOD) : traçage de ses sources et dynamique dans la plaine de la Bassée dans Sources et dynamique spatiotemporelle de la matière organique dans le bassin de la Seine, Rapport PIREN-Seine de synthèse de phase VII, Volume 5, PIREN-Seine.
- Parlanti, E., Sourzac, M., Baratelli, F., Varrault, G., Flipo, N., 2018. Propriétés optiques de la matière organique dissoute (MOD) : traçage de ses sources et dynamique dans la plaine de la Bassée.
- Passy, P., Viennot, P., Gallois, N., Billen, G., Garnier, J., Silvestre, M., Thieu, V., Flipo, N., 2018. Modélisation des apports diffus d'azote et de phosphore aux masses d'eau de surface du bassin Seine-Normandie.
- Petit, C., 2014. Collecte de grandes cultures biologiques en Île-de-France. Quels modes d'organisation et dynamiques d'intégration au sein de structures conventionnelles ? *Économie Rural. - Agric. Aliment. Territ.* 339–340, 33–47.
- Priadi, C., Le Pape, P., Morin, G., Ayrault, S., Maillot, F., Juillot, F., Hochreutener, R., Llorens, I., Testemale, D., Proux, O., Brown, G.E.J., 2012.

- X-ray absorption fine structure evidence for amorphous zinc sulfide as a major zinc species in suspended matter from the Seine river downstream of Paris, Ile-de-France, France. *Environ. Sci. Technol.* 46, 3712–3720.
- Qasmi, S., Cassou, C., Boé, J., 2017. Teleconnection Between Atlantic Multidecadal Variability and European Temperature: Diversity and Evaluation of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 Models. *Geophys. Res. Lett.* 44, 11140–11149.
- Quesada, B., Vautard, R., Yiou, P., Hirschi, M., Seneviratne, S., 2012. Asymmetric European summer heat predictability from wet and dry winters and springs. *Nat. Clim. Chang.* 2, 736–741.
- Queyrel, Q., Habets, F., Blanchoud, W., Ripoche, D., Launay, M., 2016. Pesticide fate modeling in soils with the cropmodel STICS: Feasibility for assessment of agricultural practices 542, 787–802.
- Raimonet, M., Vilmin, L., Flipo, N., Rocher, V., Laverman, A.M., 2015. Modelling the fate of nitrite in an urbanized river using experimentally obtained nitrifier growth parameters. *Water Res.* 73, 373–387.
- Rejiba, F., Schamper, C., Chevalier, A., Deleplancque, B., Hovhanessian, G., Thiesson, J., Weill, P., 2018. Multiconfiguration electromagnetic induction survey for paleochannel internal structure imaging: a case study in the alluvial plain of the river Seine, France, *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 159-170. <https://doi.org/10.5194/hess-22-159-2018>
- Rivière, A. (2019) – Fonctionnements hydrogéophysiques et biogéochimiques des interfaces nappe-rivière : conséquences sur la ressource en eau, Rivière et al. (eds.), *Rapports de synthèse de la phase VII du PIREN-Seine, Volume 4, 2019 (PIREN2019k)*.
- Rivière, A., Flipo, N., Goblet, P., Cucchi, K., Berrhouma, A., Baudin, A., Marlot, L., Seraphin, P., Schleifer, J., Ansart, P., Blanchouin, A. and Mouchel, J.-M. (2019) – Réseau de suivi « MONitoring LOCAL des échanges NAppe Rivière », *Rapports d'activité, PIREN-Seine (PIREN2019i)*.
- Rivière, A., Flipo, N., Ansart P. Baudin, A., Marlot, L., 2018. Revue des données de température du bassin des Avenelles.
- Rivière, A., Thomas, W., Ung, P., Évolution des températures de la Seine jusqu'en 2022. Dans Rivière, A. (ed), *Transferts de chaleur et températures des eaux, PIREN-Seine, Rapport de synthèse phase VIII, Volume 4, 2023, pp. 7-43*
- Rodríguez-Zaragoza, S. Ecology of free-living amoebae *Critical reviews in microbiology*, 1994
- Rouxel, O., Ludden, J., Fouquet, Y., 2003. Antimony isotope variations in natural systems and implications for their use as geochemical tracers. *Chem. Geol.* 200, 25–40.
- Servais, P., Garnier, J., Demarteau, N., Brion, N., Billen, G., 1999. Supply of organic matter and bacteria to aquatic ecosystems through waste water effluents. *Water Res.* 33, 3521–3531.
- Schaefer et al. *Environ. Sci. Technol.* 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04108>.
- Silvestre, M., Billen, G., Garnier, J., 2015. Évaluation de la provenance des marchandises consommées par un territoire : AmstraM, une application de webmapping basée sur les statistiques de transport et de production. In: *Écologie Industrielle et Territoriale : COLEIT 2012*. Presses de Mines, Paris, pp. 361–370.
- Talleg, G., Ansart, P., Guérin, A., Delaigue, O., Blanchouin, A., 2015. Observatoire Oracle ; Irstea.
- Talleg, G., Tales, E., Flinck, A., Zham, A., Belliard, J., Le~Pichon, C., 2018. Variations temporelles de l'ADN environnemental pour l'évaluation des espèces piscicoles sur le bassin versant de l'Orgeval.
- Tedesco, C., Petit, C., Billen, G., Garnier, J., Personne, E., 2017. Potential for recoupling production and consumption in peri-urban territories: The case-study of the Saclay plateau near Paris, France. *Food Policy* 69, 35–45.
- Thibault A., S. Derenne, E. Parlanti, C. Anquetil, M. Sourzac, H. Budzinski, L. Fuster, A. Laverman, C. Roose-Amsaleg, E. Viollier, and A. Huguet (2019). Dynamics of organic matter in the Seine Estuary (France): Bulk and structural approaches. *Marine Chemistry* 212, 108–119.
- Tong, M., Yuan, S., Ma, S., Jin, M., Liu, D., Cheng, D., Liu, X., Gan, Y., Wang, Y., 2016. Production of abundant hydroxyl radicals from oxygenation of subsurface sediments. *Environ. Sci. Technol.* 50, 214–221.
- Tournebize, J., Seguin, L., Bouarfa, S., Chaumont, C., Lebrun, J., Bontoux, C., Berthomé, B., Letournel, G., Barataud, F., Arrighi, A., Guichard, L., Bonifazzi, M., Birmant, F., Roger, L., Royer, L., Hureau, D., Farinetti, A., Pages, C., Rougier, J.-E., 2018. Projet Brie'EAU : Vers une nouvelle construction de paysage agricole et écologique sur le territoire de la Brie : associer qualité de l'eau et biodiversité.
- van der Lee, J., De Windt, L., Lagneau, V., Goblet, P., 2003. Module-oriented modeling of reactive transport with HYTEC. *Comput. Geosci.* 29, 265–275.
- Varrault, G., Nguyen, P.T., Mtar, Z., Soares-Pereira, C., Bonnot, C., Parlanti, E., Garnier, J., Derenne, S., Benedetti, M., Gelabert, A., Bressy, A., Boudahmane, L., Guo, Y., Parot, J., Mercier, B., Martinez, A., Cordier, M.-A., Cordier, L., Anquetil, C., Tharaud, M., Saad, M., 2016. La matière organique dans le bassin de la Seine : variabilité, sources et influence sur la spéciation des micropolluants.
- Varrault, G., Parlanti E., Matar Z., Garnier J., Nguyen P. T., Derenne S., Rocher V., Muresan B., Louis Y., Soares-Pereira C., Goffin A., Benedetti M. F., Bressy A., Gelabert A., Guo Y., Cordier M.-A. (2020). Aquatic Organic Matter in the Seine Basin: Sources, Spatio-Temporal Variability, Impact of Urban Discharges and Influence on Micro-pollutant Speciation. In: Flipo, N., Labadie, P., Lestel, L. (eds) *The Seine River Basin. The Handbook of Environmental Chemistry*, vol 90. Springer, Cham. https://doi-org.docelec.u-bordeaux.fr/10.1007/698_2019_383
- Viennot, P., Gallois, N., 2017. Scénarios d'évolution climatique Impacts et incertitudes : Étude complémentaire aux travaux du PIREN-Seine.
- Vilmin, L., 2014. Modélisation du fonctionnement biogéochimique de la Seine de l'agglomération parisienne à l'estuaire à différentes échelles temporelles. MINES ParisTech.
- Vilmin, L., Aissa-Grouz, N., Garnier, J., Billen, G., Mouchel, J.-M., Poulin, M., Flipo, N., 2015. Impact of hydro-sedimentary processes on the dynamics of soluble reactive phosphorus in the Seine River. *Biogeochemistry* 122, 229–251.



Vittecoq, M., et al. 2023. *EcoHealth*, doi:10.1007/s10393-023-01638-7.

Wan et al. *Water Research* 2022. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118689>.

Xie et al. *Environ. Sci. Technol.* 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04870>.

Zhao et al. *Environ. Sci. Technol.* 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c02302>.

Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al (2001) Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science* 292:686–693. <https://doi.org/10.1126/science.1059412>





Le PIREN-Seine poursuit depuis 30 ans son objectif de développer une vision d'ensemble du fonctionnement du bassin versant de la Seine et de la société humaine qui l'investit, pour permettre une meilleure gestion qualitative et quantitative de la ressource en eau. Pour sa phase 9 (2025 – 2028), le programme se déclinera en 5 axes de recherche, et mettra à disposition ses résultats via deux cellules dédiées.

Les axes de recherche de la phase 9



Vulnérabilités au changement climatique



Flux de matières dans les filières et impacts



Histoire, paysages, territoires et restauration écologique



Contaminants : effets sur les écosystèmes et la santé

Transferts biogéochimiques le long du continuum

Les cellules dédiées



Transfert des connaissances



Modèles et données