



PIREN-Seine

Phase 8 (2020-2023)

Programme pluri-annuel

Version révisée suite au Comité de
Coordination du 3 avril 2019





Sommaire

Vue d'ensemble.....	7
1.Axe 1 : Trajectoires du bassin, de ses tissus urbains, et de ses territoires au prisme du système agro-alimentaire et de l'adaptation au changement climatique (J. Garnier, S. Barles)	13
BLOC 1.1. Préparer les outils pour analyser les trajectoires	14
1.1.1 Modèle biogéochimique RIVE unifié	14
1.1.2 Modélisation du carbone inorganique dans les aquifères : développements numériques et applications à différentes échelles	15
1.1.3 Modélisation de la réactivité biogéochimique des interfaces nappes-rivières	16
BLOC 1.2. Trajectoires du système hydro-agro-alimentaire	17
1.2.1 Variabilité et trajectoires climato-hydrologique du bassin de la Seine.....	18
1.2.2 Les pesticides : impact d'une crise sanitaire à venir	20
1.2.3 Dynamique du système agro-alimentaire des territoires-types du bassin de la Seine.	21
1.2.4 Restaurer les services écosystémiques à l'échelle d'un territoire de la Brie : ANCOEUR 2030.	23
1.2.5 Les filières de transformation agro-alimentaire : lieu de verrouillage socio-technique ou moteur de changement ?.....	24
BLOC 1.3. Des scénarios à la croisée des territoires et des politiques.....	25
1.3.1 Scénarios du système alimentaire de la métropole parisienne en transition : flux, acteurs, politiques et territoires.....	25
1.3.2 Évaluation environnementale des scénarios à l'échelle du bassin	27
2.Axe 2 : Fonctionnement du bassin soumis à des extrêmes hydro-climatiques (A. Rivière, V. Thieu)	29
BLOC 2.1. Les impacts directs des extrêmes climatiques sur le cycle de l'eau et les transferts d'énergie au sein de l'hydrosystème Seine.....	30
2.1.1 Trajectoires et extrêmes hydro-thermiques	30
2.1.2 Rétroactions des eaux souterraines sur le climat	32
2.1.3 Extrêmes piézométriques et sécheresses hydrologiques dans l'hydrosystème Seine .	33
BLOC 2.2. Une cascade d'effets induits sur les écosystèmes aquatiques	35
2.2.1 Devenir du carbone lors d'évènements extrêmes	35
2.2.2 Modélisation de la réactivité biogéochimique de l'interface nappe-rivière du bassin de l'Orgeval	37
2.2.3 Impacts indirects des extrêmes hydro-climatiques sur les peuplements de poissons .	37
BLOC 2.3. Conséquences en termes de gestion et d'exploitation de la ressource	38
2.3.1 Gestion quantitative de la ressource en eaux.....	38
2.3.2 Les réservoirs, composants des continuums aquatiques: rétentions et émissions	40
3.Axe 3. Construction de la qualité des milieux aquatiques conciliant risques hydrologiques et biodiversité (L. Lestel, N. Flipo)	43

BLOC 3.1. Trajectoires des cours d'eau périurbains.....	43
3.1.1 Trajectoires biophysiques des petites rivières périurbaines d'Île de France, de leur aménagement à leur restauration	44
3.1.2 Penser et faire la restauration des petits cours d'eau métropolitains.....	45
BLOC 3.2. La Bassée, un projet de territoire à enjeux multi-échelles	45
3.2.1 Construction des futurs souhaitables pour la plaine alluviale de la Bassée	46
3.2.2 Chenaux abandonnés de la Bassée	47
3.2.3 Modélisation hydrodynamique des interactions surface-souterrain dans la plaine alluviale de la Bassée.....	48
3.2.4 Fonctionnement biogéochimique des gravières de la plaine de la Bassée et leurs interactions avec la nappe	49
3.2.5 Connectivité hydraulique et réactivité biogéochimique de la plaine alluviale de la Bassée	50
3.2.6 Fonctionnement thermique de la Bassée	51
3.2.7 Trajectoires socio-écologiques de la Bassée depuis le XIX ^e siècle.....	53
4.Axe 4. Ambitions et enjeux pour la Métropole en 2024 ⁺ (J-M. Mouchel, G. Varrault)	
.....	55
BLOC 4.1. Enjeu baignade.....	55
4.1.1 Simulation des bactéries indicatrices fécales (BIF) en rivière	56
4.1.2 Mortalité des bactéries indicatrices de contamination fécale (BIF) dans les sédiments de rivière du bassin de la Seine	57
4.1.3 Relation entre les Bactéries Indicatrices de contamination Fécale et les pathogènes hydriques.....	58
4.1.4 Sociologie de l'enjeu baignade : attentes et perceptions des usagers et des acteurs de la gouvernance du risque vis-à-vis de la baignade.....	60
4.1.5 Présence des leptospires dans le bassin de la Seine	61
BLOC 4.2. Enjeu carbone et nutriment dans les eaux de la Seine sous influence urbaine.	61
4.2.1 Mise en synergie des observations et des modèles par assimilation de données.....	62
4.2.2 Raffiner la caractérisation des sorties du réseau d'assainissement.....	63
4.2.3 Synergie avec le réseau de mesure haute fréquence PHRESQUES.....	64
4.2.4 Dégradabilité de la MO dans les milieux récepteurs aquatiques sous forte pression urbaine par spectrofluorométrie haute fréquence.....	65
BLOC 4.3. Thermie de la Seine à la traversée de Paris et de la petite couronne	67
4.3.1 Thermie de la Seine à la traversée de Paris et de la petite couronne.....	67
BLOC 4.4. Micropolluants.....	68
4.4.1 Modélisation du transfert des micropolluants dans l'axe Seine	68
BLOC 4.5. Hydrogéologie de l'agglomération parisienne.....	69
4.5.1 Risques liés aux remontées de nappe	69
4.5.2 Évaluation de l'impact de la réinfiltration des eaux pluviales.....	70



5.Axe 5 : Dynamique des contaminants : de la compréhension des processus au métabolisme territorial (A. Gélabert, H. Blanchoud)	73
BLOC 5.1. Transfert des contaminants à l'échelle du Bassin versant de la Seine	73
5.1.1 Microplastiques dans le bassin de la Seine : des études locales au bassin versant Seine	74
5.1.2 Sources et flux de nanoparticules manufacturées	76
5.1.3 Recherche de nouveaux contaminants le long de l'axe Seine Marnay / Bougival / Triel/ Poses	76
5.1.4 Suivi de la qualité de la MO le long de l'axe Seine Marnay / Bougival / Triel/ Poses ...	77
BLOC 5.2. Processus bio-physico-chimiques des contaminants à l'échelle locale	78
5.2.1 Les biofilms dans le cycle des polluants	78
5.2.2 Dégradation naturelle des contaminants organiques aux interfaces redox	80
5.2.3 Identification de la phase porteuse des micropolluants dans les particules atmosphériques.....	81
5.2.4 Sources, processus de transfert et écotoxicologie de la contamination urbaine par l'antimoine	82
BLOC 5.3. Interactions biote - contaminants	84
5.3.1 Diagnostic de la qualité écotoxicologique, chimique et sanitaire au niveau du bassin de la Seine	85
5.3.2 Micropolluants d'intérêt émergent en Seine : niveaux, profils et déterminants de la contamination chez deux organismes sentinelles, la dreissène <i>Dreissena polymorpha</i> et le chevesne <i>Squalius cephalus</i>	86
5.3.3 Impact de la contamination par les pesticides sur les communautés piscicoles	88
BLOC 5.4. Prospective sur les contaminants	88
5.4.1 Représentation et prospective de la pression chimique.....	89
5.4.2 Archives sédimentaires : reconstruire les trajectoires temporelles des contaminants	90
6.Transfert de connaissances (A. Deloménie).....	93
BLOC 6.1. La cellule de transfert des connaissances.....	93
BLOC 6.2. Des données partagées et accessibles.....	96
7.Développement d'outils.....	99
8.Références.....	101
9.Annexe Financière	105
9.1 Dépenses prévisionnelles pluri-annuelles détaillées	105
9.2 Recettes prévisionnelles pluri-annuelles.....	105



Vue d'ensemble

La phase huit (2020-2023) du programme de recherche PIREN Seine s'inscrit dans un processus à l'œuvre depuis 30 ans visant à mettre en synergie scientifiques et gestionnaires de l'eau et des milieux aquatiques du bassin de la Seine en vue de construire un socio-écosystème durable et résilient vis-à-vis des enjeux environnementaux et sociaux actuels. À cet effet, le programme a contribué à construire la connaissance relative au fonctionnement, du bassin et de ses territoires, inscrit dans la durée. Ce corpus de connaissances a été constitué grâce à un intense travail de collecte de données et de leur analyse afin de conceptualiser les processus à l'œuvre. Cette compréhension des mécanismes a ensuite permis d'élaborer des synthèses sous forme de trajectoires et d'outils de simulation numérique. Une production scientifique et technique a ainsi vu le jour sous forme de multiples ouvrages, d'articles scientifiques, de rapports techniques, et plus récemment de documents synthétiques s'adressant à un public élargi via des documents de vulgarisation et un site internet (www.piren-seine.fr).

La prochaine phase du programme perpétuera cette approche via une stratégie d'échantillonnage du bassin structurée autour de sites ateliers permettant de capitaliser des données sur le temps long et de mettre en synergie l'ensemble des disciplines scientifiques mobilisées par le programme. Ces sites ateliers ont pour vocation finale la compréhension de l'évolution de l'anthropo-hydro-écosystème Seine dans son ensemble. A cet effet, quatre sites majeurs sont suivis afin d'évaluer la trajectoire des milieux représentatifs du bassin :

- l'axe aval de la Seine depuis l'amont de l'agglomération parisienne jusqu'à l'entrée de l'estuaire, qui intègre l'ensemble des flux du bassin
- le bassin de l'Orge qui présente un gradient rural-urbain sur une extension spatiale plus réduite que celle du bassin de la Seine
- la large plaine alluviale rurale de la Bassée
- le petit bassin versant agricole de l'Orgeval

L'impact du métabolisme urbain sur le milieu sera étudié en coordination étroite avec les programmes OPUR et MOCOPEE. Les impacts intégrés du bassin de la Seine sur le système estuarien pourront également être étudiés en collaboration avec le GIP Seine aval dans le cadre de la Zone Atelier Seine et les études seront coordonnées grâce aux différents projets soutenus par le CPIER Vallée de Seine. Ces projets structurants sont PHRESQUES (suivi haute fréquence des macronutriments et de la diversité phytoplanctonique), PLASTIC-SEINE (suivi des plastiques), et CONSACRE (continuité écologique au prisme de l'accessibilité aux habitats par certaines espèces de poissons emblématiques). Sur la question de la restauration écologique, les travaux de la prochaine phase du programme seront également mis en perspective du projet d'effacement d'ouvrages en cours sur le bassin de la Sélune, pour lequel les équipes du PIREN Seine contribuent au projet LEARN (connectivité hydraulique rivière-nappe).

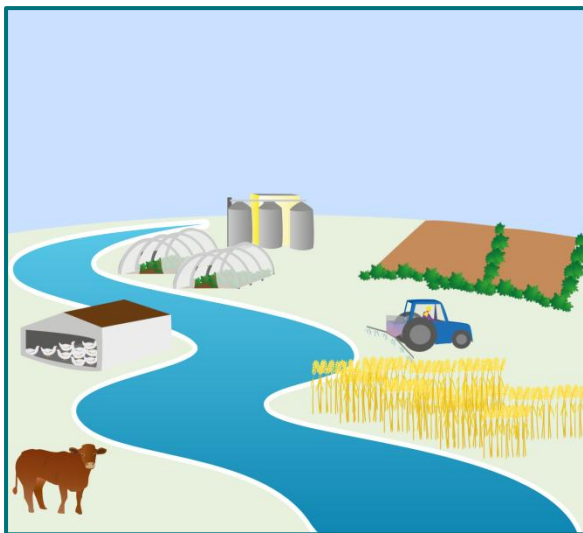
Au cœur des travaux du PIREN Seine réside également le développement d'outils numériques de quantification du métabolisme territorial. Ces outils sont fréquemment mobilisés par les partenaires du programme pour évaluer l'état du milieu, et sont aujourd'hui partagés pour évaluer des scénarii d'évolution du bassin sous hypothèse de changement de pratiques agricoles en intégrant les effets du changement climatique. La prochaine phase poursuivra le développement de ces outils et notamment de la plateforme STICS-CaWaQS-pyNuts-RIVERSTRAHLER en y intégrant par exemple le fonctionnement biogéochimique des aquifères et des interfaces nappe-rivière et le transfert de polluants comme les pesticides.

La phase huit est structurée en cinq axes de travail thématiques et un axe de transfert des connaissances afin de répondre à de grands défis environnementaux, comme la **restructuration de la chaîne agro-alimentaire** qui a un impact considérable sur les paysages du bassin, les flux d'éléments nutritifs et de polluants organiques, et sur la biodiversité. Les actions humaines associées à ce système de production agricole industrialisé et mécanisé produisent une quantité considérable de gaz à effet de serre qui sont le moteur de la crise climatique actuelle. Malgré son évidence, l'influence de l'augmentation de la température globale de l'air sur le fonctionnement des socio-écosystèmes a très peu été étudiée, souvent faute de suivi spatio-temporel représentatif. Il s'agira ainsi de combler ce manque et d'intégrer les **extrêmes climatiques** dans leurs dimensions thermique et hydrique, et leurs conséquences sur la biodiversité et sur les risques encourus par les populations. Ces risques seront ainsi étudiés à l'échelle de territoires emblématiques du bassin versant, comme les petites rivières urbaines et les grandes plaines alluviales, où les nombreux enjeux multi-échelles et multi-acteurs nous renvoient à la difficulté de **construire des projets de territoire** à la hauteur des enjeux sociaux et écologiques. La piste de réflexion qui sera explorée dans cette phase est celle du co-bénéfice relatif à la restauration écologique du corridor hydro-écologique¹ et la réduction des risques d'inondation dans les agglomérations. En sus des risques hydrologiques, les villes, et plus particulièrement la **Métropole du Grand Paris**, qui concentre plus de 70 % de la population du bassin, est également en mutation écologique afin de reconquérir son fleuve en y promouvant la baignade. Ce défi, en relation avec l'organisation des Jeux Olympiques en 2024, pose la question de la gestion des effluents urbains, et des nouvelles technologies mobilisables afin de gérer de manière intégrée le traitement des effluents issus du métabolisme urbain et leur impact sur le milieu naturel, fleuve ou sols. Enfin, de nombreux polluants, produits sous l'impulsion d'une offre et d'une demande, génèrent une **contamination massive des milieux aquatiques**, engendrant des effets écotoxicologiques difficiles à évaluer et qui posent la question des risques sanitaires. Si une approche de métabolisme territorial a pu être mise en place pour l'azote, il n'en va pas de même de ces molécules complexes et multi-usages. L'enjeu de cette phase sera de construire, autant que faire se peut, une vision intégrée offre/demande-flux-impact, en vue de les introduire dans la scénarisation des futurs possibles du bassin de la Seine.

Les six axes sont brièvement décrits ci-après.

¹ Le corridor hydro-écologique représenté par le corridor hydraulique connecté aux eaux souterraines d'accompagnement et aux annexes hydrauliques, dont les zones humides

Trajectoires du bassin, de ses tissus urbains, et de ses territoires



Le bassin de la Seine est constitué d'une mosaïque de systèmes urbains, agricoles, semi-naturels et hydrologiques, tous en interaction. Le métabolisme territorial qui en résulte ne peut se comprendre sans analyser dans la durée tant les héritages biogéochimiques que les structures socio-techniques. Des images de fonctionnement écologiquement plus durables du système Seine sont d'ores et déjà établies, mais il reste à analyser des chemins plausibles et ancrés dans les territoires pour y parvenir, compte tenu des freins et des atouts liés à ces héritages et ces structures. Les recherches menées au sein de cet axe s'appuieront sur une réflexion sur l'évolution du

système agro-alimentaire du bassin soumis à un climat changeant, une des clés de la transition socio-écologique.

Fonctionnement du bassin soumis à des extrêmes hydro-climatiques



Si l'éventail des projections climatiques reste encore assez large, les modèles de climat s'accordent aujourd'hui pour le bassin de la Seine sur une augmentation de la fréquence et/ou de l'intensité des extrêmes climatiques (température de l'air et précipitations). L'objectif de cet axe sera de quantifier les impacts des extrêmes climatiques (crues, étiages, sécheresses hydrologiques) sur la disponibilité des ressources en eau, la qualité des milieux aquatiques et les peuplements piscicoles, avec une attention particulière sur les impacts thermiques. Des préconisations de gestion des eaux seront établies en vue d'une adaptation à l'évolution de ces extrêmes, avec le test de

différentes solutions de gestion.

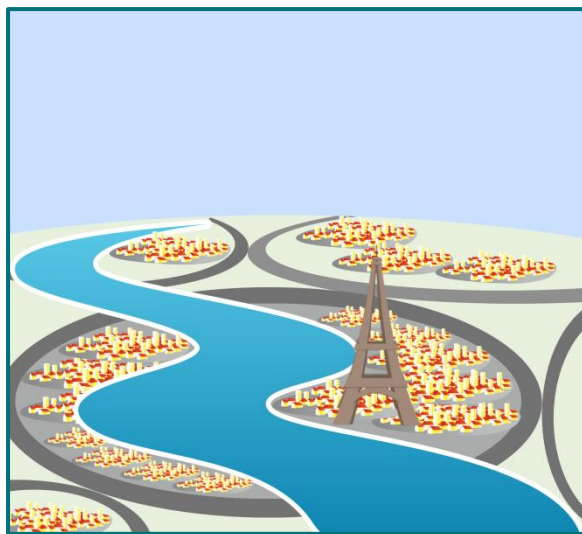
Construction de la qualité des milieux aquatiques conciliant risques hydrologiques et biodiversité



Cet axe analyse la manière dont la qualité des milieux se construit avec l'évolution de la société et des usages dans les territoires (agricoles et industriels, protection contre les inondations, biodiversité, etc.) et comment différents groupes d'acteurs se l'approprient. Il allie une approche réflexive sur les outils et les connaissances construites dans le cadre du PIREN Seine et une étude de l'établissement d'indicateurs de fonctionnement tant physico-chimique, qu'hydromorphologique, écologique ou paysager de deux types de terrains : les petits cours d'eau périurbains sur lesquels portent les opérations de restauration, et les grandes plaines alluviales aux

enjeux multi-échelles dont notamment la plaine alluviale de la Bassée. Grâce à ces deux contextes hydromorphologiques, l'influence de la renaturation des lits majeurs sur la réduction des risques inondation sera également étudiée à différentes échelles.

Ambitions et enjeux pour la Métropole en 2024 et après...



Au sein du bassin de la Seine, la métropole parisienne est d'une extrême importance par les pressions qu'elle exerce sur le milieu, alors que la qualité des grandes et petites rivières de la métropole est porteuse d'enjeux toujours plus nombreux pour la vie des habitants. Il s'agira ici de réinterroger les impacts de la métropole sur le milieu à la lumière de nouveaux questionnements et de nouvelles méthodes pour l'appréhender (mesures haute-fréquence, bilans du métabolisme urbain). Le système d'assainissement de l'agglomération parisienne est de plus en plus performant et maîtrisé, des investissements majeurs ont été réalisés au cours de la dernière décennie, pour l'amélioration à la fois des

capacités d'épuration et de des capacités de gestion des réseaux (stockages, maillages). Cependant, la taille de l'agglomération parisienne et de son système d'assainissement face aux capacités de dilution limitées de la Seine exigent un niveau de performance toujours plus élevé et durable alors que de nouveaux enjeux se précisent : gestion améliorée de l'assainissement, baignade, contamination chimique et biologique, régulation thermique, et risques de remontées de nappe. Cet axe de travail se concentre sur le fonctionnement actuel du fleuve sous influence urbaine, sur l'acquisition et l'utilisation de nouvelles données pour de meilleures simulations de la qualité afin de soutenir des politiques en cours de construction avec des échéances de l'ordre de la dizaine d'années.

Dynamique des contaminants : de la compréhension des processus au métabolisme territorial



Le PIREN Seine s'intéresse à un large éventail de micropolluants et à leurs effets combinés sur les microorganismes. Différentes approches ont été développées afin de caractériser cette contamination (archives sédimentaires, continuum sur l'axe fluvial, etc.) ou de mettre en lumière ces effets (transfert dans la chaîne trophique, effet sur le vivant, etc.). Il s'agira d'identifier des nouveaux enjeux liés aux micropolluants dans un cadre cognitif allant de la caractérisation de l'état de contamination du système à une conceptualisation en termes de métabolisme territorial qui permet notamment de relier des pratiques à un état. Il est ainsi envisagé de combiner un « métabolisme des matériaux »

(entrée - bilan - usage de la société) avec un « métabolisme environnemental » (processus dans le milieu - interactions avec le biote).

Transfert de connaissances



Le transfert des connaissances générées par le programme est assuré depuis 2016 par une cellule dédiée. La mission de cette cellule « transfert des connaissances », co-animée par l'association ARCEAU-IdF et le PIREN Seine, est de faciliter les échanges entre les équipes de recherche et les partenaires, et de valoriser les résultats ainsi construits auprès d'un public élargi.

Pendant la phase huit du programme, la cellule transfert continuera la production et la mise en ligne sur le site du PIREN Seine (www.piren-seine.fr) de documents papiers et numériques adaptés aux différents publics : fascicules, fiches thématiques « 4 pages » et posters. La présence

sur le web étant un puissant vecteur de diffusion des savoirs, un enrichissement du site en nouveaux contenus, tant sur le fond (diversification des thématiques traitées) que sur la forme (multiplication des formats pour permettre l'accessibilité à un public divers) sera opéré au fur et à mesure de la phase.

Outre la poursuite de la production et de l'enrichissement des plateformes existantes, la cellule a pour projet de développer des documents visant à rendre accessible la compréhension des outils et méthodes développés et utilisés au sein du PIREN-Seine. Cette démarche s'inscrit dans la ligne prévue par le PIREN Seine de mettre à disposition l'accès à ces outils sur le site web du programme.

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 ateliers/réunions/colloques/conférences organisés par les acteurs du bassin et auprès des élus du bassin. Cet investissement permettra de représenter les scientifiques du programme dans des

instances locales et de faire remonter des informations depuis les territoires vers les équipes de recherche. 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 (GIP Seine-Aval et OPUR). Dans ce cadre, un colloque ZA Seine sera organisé en 2020.

Données et modèles



Associées au transfert de connaissance, la bancarisation et la valorisation des données et des résultats de simulation du PIREN Seine feront également l'objet d'un travail important avec pour objectif final la constitution d'une base de données commune, partagée et accessible aux partenaires gestionnaires et scientifiques du programme.

D'importantes campagnes de terrain seront organisées sur les sites ateliers en coordination entre les équipes pour enrichir notre connaissance des processus à l'œuvre et la base de données. Parallèlement, un important travail de développement de méthodes et d'outils de

simulation sera réalisé. Les principaux développements numériques seront également mieux coordonnés, avec une mutualisation des moyens de développement accrue. Les principaux développements seront :

- Suivi innovant de la qualité sanitaire des eaux pour la baignade et stratégie de communication associée
- Mise en synergie des données haute fréquence et des modèles par assimilation de données dans ProSe en connexion avec la chaîne de traitement des eaux amont
- Modélisation des plaines alluviales de la Bassée et de la métropole du Grand Paris, comprenant les écoulements de surface et les eaux souterraines en contexte régional, et les fonctionnements géochimique et écologique du milieu. Couplage avec géohistoire pour le développement d'indicateurs socio-écologiques
- Échantillonnages intégrés et conjoints des contaminants, comprenant des émergents (plastiques, nanoparticules, metformine, et métaldéhyde), et leurs-effets écotoxicologiques (POCIS, membranes, modèles biologiques encagés, biofilms)
- Bilans quantitatifs de matières, dont des contaminants à l'échelle de territoires et du bassin
- Signature du Carbone des différents compartiments sols, eaux souterraines, gravières, cours d'eau, rivières sous différentes conditions hydrologiques
- Plate-forme de simulation du métabolisme C/N/P/Si à l'échelle de l'ensemble du bassin et de son réseau hydrographique STICS-CaWaQS/RIVERSTRAHLER-PyNuts, incluant le fonctionnement géochimique des aquifères et la spéciation du carbone, pour quantifier les scénarios co-construits
- Intégration explicite de la végétation dans les modèles, transferts d'énergie dans l'ensemble du bassin, cartographies thermiques multi résolution depuis les drones (décimétrique) jusqu'aux images satellitaires (kilométrique)
- Développement de l'outil de simulation du transfert des micro-polluants, dont les pesticides, par familles d'espèces



1. Axe 1 : Trajectoires du bassin, de ses tissus urbains, et de ses territoires au prisme du système agro-alimentaire et de l'adaptation au changement climatique (J. Garnier, S. Barles)

Le bassin de la Seine est constitué d'une mosaïque de systèmes urbains, agricoles, semi-naturels et hydrologiques, tous en interaction. Le métabolisme territorial qui en résulte ne peut se comprendre sans analyser dans la durée tant les héritages biogéochimiques que les structures socio-techniques. Des images de fonctionnement écologiquement plus durables du système Seine sont d'ores et déjà établies, mais il reste à analyser des chemins plausibles et ancrés dans les territoires pour y parvenir, compte tenu des freins et des atouts liés à ces héritages et à ces structures. Les recherches menées dans cet axe s'appuieront sur une réflexion autour de l'évolution du système hydro-agro-alimentaire du bassin qui s'avère être une des clés de la transition socio-écologique.

Cette transition socio-écologique implique les quantités et qualité de l'eau, composante fondamentale du socio-écosystème Seine. Sur le plan économique, l'eau est à la fois un facteur de croissance (industrie, agriculture, navigation) et de risques (étiages sévères, inondations). Sur le plan physico-chimique, elle est à la fois un vecteur et une source conditionnant la transformation des paysages et du vivant (réactions biogéochimiques, transport de matière et de chaleur). La question du devenir de la ressource en eau en réponse aux évolutions de ses usages, de la morphologie des territoires et de la variabilité du climat, par définition d'emprise planétaire, est primordiale pour appréhender le devenir des territoires.

Les approches seront multiples :

- Développement d'approches prospectives basées sur l'analyse et le traitement du signal hydroclimatique
- Couplages et développement de modèles pour explorer les scénarios co-construits, les récits et évaluer leurs conséquences environnementales
- Bilans quantitatifs de matières, d'éléments à l'échelle de territoires et du bassin
- Analyses d'archives, analyses de données existantes (statistiques...), acquisition de données sur le terrain qualitatives et quantitatives
- Analyses des débats prospectifs sur l'environnement, l'urbanisme, l'agriculture et les points de controverse
- Ateliers participatifs de prospectives, de construction de scénarios, pour identifier les voies d'accès et les verrous
- Enquêtes pour des constructions de récits (de vie, de dynamiques de socio-écosystèmes)

BLOC 1.1. Préparer les outils pour analyser les trajectoires

Trois actions majeures ont été identifiées pour l’aboutissement d’une plateforme de modélisation complète du bassin de la Seine. Cette plateforme prend en compte en amont les rotations culturales et pratiques agricoles grâce au modèle agronomique STICS des flux d’azote dans le système sol-eau-plantes. STICS fournit des flux nitriques au modèle CaWaQS, qui remplace à MINES ParisTech le logiciel MODCOU. CaWaQS est une structure modulaire qui permet notamment de simuler les flux hydriques dans tous les compartiments d’un hydrosystème : bilan hydrologique de surface, ruissellement sur les sols et dans le réseau hydrographique, écoulements en zone non saturée et dans les systèmes aquifères. Les flux d’eaux et d’azote issus de CaWaQS sont pris en charge par la modélisation biogéochimique des eaux de surface, RIVERSTRAHLER. Ce chainage a été réalisé en 2018, en tenant compte partiellement des processus hydrologiques et biogéochimiques aux interfaces nappes-rivières (Passy et al., 2018). De plus les processus conduisant à la production et aux émissions des gaz à effet de serre (GES) doivent être introduits dans tous les compartiments de l’hydrosystème, notamment dans les aquifères. Unifier l’introduction des gaz à effet de serre nécessite de mettre à plat le modèle RIVE, qui depuis sa formalisation d’origine au début du PIREN-Seine a connu des modifications, qui n’ont pas été forcément discutées et maîtrisées.

C’est cette plateforme, qui permettra d’explorer les scénarios du futur du bassin, et ainsi de quantifier leurs impacts environnementaux en termes de qualité de l’eau et d’émissions de GES.

1.1.1 Modèle biogéochimique RIVE unifié

La modélisation RIVE est au cœur des développements de plusieurs équipes de recherche (cf. www.fire.upmc.fr/rive; (Billen et al., 1994; Garnier et al., 1995)) au sein du PIREN-Seine mais également à l’international (Univ. Bruxelles, Univ Utrecht) et en France (UMR METIS, MINES ParisTech, ECOLAB-Univ. Toulouse, notamment). Depuis sa première version en 1994, la description des processus a évolué : intégration du cycle de la silice et des diatomées, des bactéries fécales, dynamique du phosphore, représentation des processus benthiques, dynamique du carbone inorganique et des gaz dissous, etc.

L’objectif de cette action est de converger vers un cœur de modélisation RIVE unique qui rassemble l’ensemble des développements récents coexistant dans des codes de calculs différents. Idéalement cette version "unifiée" disposera de modules optionnels/activables et/ou paramétrables, afin de pouvoir continuer à être utilisée par l’ensemble des équipes qui contribuent au développement de RIVE.

Les objectifs poursuivis dans cette action sont les suivants :

- Harmoniser les versions de RIVE sous forme d’une librairie de calcul
- Assurer l’intégration de cette version unifiée dans les outils mobilisant RIVE, notamment RIVERSTRAHLER, ProSe, CaWaQS, BARMAN
- Proposer un dépôt de la librairie associé à une licence libre permettant sa réutilisation au sein de la communauté scientifique et des partenaires PIREN-Seine
- Documenter une version unifiée et exhaustive des processus modélisés par RIVE
- Maintenir une documentation et un versionnement des codes permettant une dynamique d’évolution pérenne et continue des développements autour de RIVE (gestion des collaborations, branches de développements, animation inter-équipes contributrices, etc.)



L'idée est clairement de faire du cœur biogéochimique RIVE un socle commun et modulaire pour des projets de modélisation aquatique ambitieux, que ce soit au travers des nouveaux éléments/molécules à modéliser (micro-polluants, gaz, etc.) ou son inclusion dans des codes déployés à plus grandes échelles (par exemple avec ORCHIDEE, modèle de simulation des flux d'eau, d'énergie et de matière à l'échelle des surfaces continentales, avec lequel un couplage à CaWaQS est en cours dans le cadre des travaux de l'axe 2). Au cours de la phase 8, des équations de transferts et transformations des pesticides dans les eaux de surface seront incluses dans un module dédié du modèle RIVE (cf. action 1.2.2, p.20). De même le transfert de micro-polluants sera formalisé en lien avec l'action 4.4.1, p. 68. Pour finir, le module évoluera afin d'intégrer les caractérisations fines de la matière organique aujourd'hui accessibles. Il s'agit d'une action transversale mobilisant des déclinaisons territoriales en termes d'échantillonnage et de développements de modèles test sur l'Orgeval (action 2.2.1, p.35), la Bassée (action 3.2.5, p.50), et l'axe Seine à la traversée de l'agglomération parisienne (action 4.2.2, p.63). En relation avec la matière organique, la simulation des gaz à effet de serre sera également intégrée dans l'outil sur la base des travaux précurseurs de (Marescaux, 2018) (action 2.3.2, p.40).

Programme 2020 - 2021 :

Au cours des années 2020 et 2021, il s'agira d'abord de transposer les équations de RIVE sous forme d'une librairie de calcul aisément couplable avec les langages de programmation C-ANSI et python, de documenter l'utilisation de cette librairie afin qu'elle puisse être intégrée facilement par d'autres modèles (nouveaux ou existants). Des propositions concrètes de gestion de la diffusion des codes et des licences associées seront élaborées. Le code unifié s'intégrera ensuite de façon opérationnelle dans les outils PIREN-Seine existants (RIVERSTRAHLER, ProSe, CaWaQS, BARMAN), afin de proposer une chaîne de modélisation cohérente autour d'un cœur biogéochimique unique. Ceci inclut des phases de test et de validation. Les bases d'une organisation pérenne des développements autour de RIVE devront être mises en place durant cette deuxième année (documentation, versionnement, liste des utilisateurs/contributeurs, cycle d'intégration pour les nouveaux développements, etc.).

Le travail d'unification a été initié en janvier 2019, et rassemble plusieurs équipes de recherche avec pour objectif de publier une version unifiée des processus de RIVE (publication collective) dès le début de la phase.

Co-financement :

Une bourse de thèse de doctorat sera demandée dès 2019 à GRNE, pour la modélisation des continuums aquatiques rivières/réservoirs/estuariers (et de la Seine en particulier), incluant la librairie RIVE unifiée mais aussi s'inscrivant dans cette dynamique d'unification. Une bourse de thèse est également fléchée dès 2019 par MINES ParisTech au sein de l'ED GRNE pour contribuer à l'assimilation de données dans le modèle ProSe. Les travaux de cette thèse contribueront à promouvoir la librairie RIVE.

1.1.2 Modélisation du carbone inorganique dans les aquifères : développements numériques et applications à différentes échelles

La mise en œuvre d'une plateforme complète de modélisation des quantités et qualités de l'eau requiert d'améliorer la compréhension du fonctionnement biogéochimique dans les aquifères et plus spécifiquement de quantifier les sources et flux du carbone inorganique et de mieux contraindre les apports en carbone inorganique dissous (CID) du système aquifère vers le réseau hydrographique

(Marescaux et al., 2018). Il s'agit à terme de quantifier la contribution des aquifères aux émissions de gaz. Cette action s'intègre dans un objectif plus large de modélisation des flux de Gaz à Effet de Serre (GES) à l'échelle des rivières du bassin de la Seine.

Cette action sera basée sur une approche intégrée, du terrain à la modélisation, avec d'une part le développement d'outils numériques, et leur utilisation sur le site atelier de l'Orgeval (action 2.2.1, p.35), afin de changer d'échelle pour simuler l'ensemble du bassin de la Seine. Cet outil servira alors à contraindre, par les flux obtenus à grande échelle, les déclinaisons territoriales de l'outil à l'échelle de la plaine alluviale de la Bassée (action 3.2.5, p.50).

La modélisation biogéochimique en milieu poreux sera réalisée grâce au couplage entre le code de spéciation géochimique CHESS, développé au centre de Géosciences de MINES ParisTech (van der Lee et al., 2003), et la plateforme de modélisation hydrologique/hydrogéologique CaWaQS. Le code CHESS représente en particulier la spéciation des carbonates, le CO₂ gazeux, les réactions de précipitation/dissolution des carbonates, ainsi que les réactions de respiration. Les isotopes du carbone sont également représentés par CHESS, et sont un outil intéressant pour discriminer les différents processus biotiques et abiotiques, affectés par des fractionnements isotopiques propres.

Programme 2020 - 2021 :

Les différentes tâches à effectuer au cours des deux années 2020 et 2021 sont :

- Revue de la littérature sur la modélisation du carbone inorganique et CO₂ en aquifère ; conceptualisation et identification des espèces chimiques, équilibres et réactions à prendre en compte (pour le cas du Bassin de la Seine, et plus spécifiquement le bassin de l'Orgeval et la plaine de la Bassée).
- Bilan des processus représentés par CHESS, mise à niveau par rapport à la conceptualisation et identification du schéma numérique pour le couplage CaWaQS – CHESS
- Identification des données de terrain (lithologie, composition chimique, gaz dissous...) nécessaires pour contraindre et calibrer le modèle
- Réalisation du couplage CaWaQS – CHESS ; validation sur un cas simple, si possible tiré de la littérature, et étude de sensibilité aux différents processus pris en compte

Une première application du code sera effectuée sur le Bassin de l'Orgeval (action 2.2.1, p.35). Les campagnes terrain, déjà rodées au cours de la phase 7 (Bassée et Orgeval), seront menées en parallèle pour enrichir les jeux de données des gaz notamment sur les différents sites en vue de la généralisation de l'application.

Co-financement :

Une demande de soutien sous forme d'une bourse de thèse sera effectuée auprès de MINES ParisTech pour la rentrée universitaire 2020.

1.1.3 Modélisation de la réactivité biogéochimique des interfaces nappes-rivières

Les interfaces nappe-rivière sont des zones biogéochimiques réactives à l'hydrologie complexe au cœur de la zone critique. Au cours de cette phase 8, la modélisation de la dynamique du carbone et des nutriments (nitrates, phosphates, sulfates) au niveau des interfaces nappe-rivière sera développée. Cette action nécessite tout d'abord de développer un outil de modélisation numérique, qui sera à terme utilisé à toutes les échelles sur les sites phares du PIREN-Seine. L'outil de



modélisation sera d'abord conceptualisé à l'échelle locale d'une interface sur les petits cours d'eau du bassin de l'Orgeval, puis à l'échelle du bassin versant de la Seine et de l'ensemble de son réseau hydrographique. Les développements numériques seront fortement couplés avec ceux de l'action 1.1.2, p.15, sur la modélisation de la géochimie du CO₂ dans les aquifères.

Ces développements numériques mobiliseront essentiellement le modèle RIVE unifié et les outils du PIREN-Seine (CaWaQS, pyNuts-RIVERSTRAHLER). Dans un premier temps, une modélisation conceptuelle simplifiée sera proposée, sur la base d'un modèle capacitif couplé au modèle classique de conductance (Flipo et al., 2014) afin d'intégrer la réactivité complexe de l'interface (Newcomer et al., 2018) à la chaîne de modélisation STICS-CaWaQS-pyNuts-RIVERSTRAHLER. À terme, la chaîne de modélisation intégrera l'estimation des flux de carbone inorganique provenant des aquifères via le couplage CaWaQS-CHESS (l'action 1.1.2, p.15). L'outil numérique devra représenter les processus majeurs intervenant au sein de la zone critique, et ainsi aux interfaces nappe-rivière, à savoir la respiration bactérienne, les processus rédox et la dynamique de l'oxygène dissous (épisodes de désoxygénation) qui contribuent à éliminer ou rendre disponibles les éléments pour les eaux de surface. Au-delà des développements numériques, cette action s'appuiera sur les données de terrain qui seront collectées dans les actions 2.2.2, p.37 pour l'Orgeval, et 3.2.5, p.50 pour la Bassée.

Programme 2020 - 2021 :

Les travaux des années 2020 et 2021 seront déclinés en 3 étapes :

- Mise en place d'un jeu de données regroupant les données hydrologiques, hydrogéologiques et biogéochimiques acquises depuis l'instrumentation du site par le GIS ORACLE (Tallec et al., 2015), le PIREN Seine (Guillon et al., 2017; Mouchel et al., 2016), et depuis plus récemment par l'Infrastructure de Recherche OZCAR (Gaillardet et al., 2018) à travers le RiverLab (Floury et al., 2017)
- À partir de ce jeu de données des bilans de matière seront établis afin d'estimer le rôle que les interfaces nappe-rivière sont susceptibles de jouer sur la transformation des macro nutriments (C, N, P, Si)
- Finalement conceptualiser la réactivité des interfaces nappe-rivière pour développer un premier modèle capacitif simple en interaction avec RIVE unifié (action 1.1.1, p.14)

Le travail se poursuivra ensuite par un déploiement de l'outil à l'échelle de la Seine, suivi d'une déclinaison territoriale dans la plaine de la Bassée (action 3.2.5, p.50).

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.

BLOC 1.2. Trajectoires du système hydro-agro-alimentaire

Des héritages, issus du fonctionnement antérieur du bassin, orientent, et parfois entravent, la trajectoire future du système. Le devenir de ces héritages sera ainsi décrit pour chacun des scénarios de transition envisagés. Un des aspects susceptibles d'engendrer des mutations importantes du système agro-alimentaire réside dans la volonté d'autonomie des exploitations vis-à-vis des intrants, et des consommateurs vis-à-vis des importations longue distance : il s'agit des processus de relocalisation et de reconnexion des systèmes agro-alimentaires.

Dans un premier temps, l'analyse des héritages biogéochimiques et socio-techniques sera raffinée en se focalisant sur le stockage historique dans les sols et les nappes, des pesticides, du carbone, du phosphore, du nitrate et sur la description des superstructures d'encadrement de l'agriculture (coopératives par ex), ainsi que des infrastructures d'assainissement des eaux urbaines. Appréhender les pesticides dans ce contexte de la trajectoire hydro-agro-alimentaire est inédite à l'échelle du bassin de la Seine (action 1.2.2, p.20). Une telle étude s'impose dès lors que des scénarios de rupture en termes de systèmes et pratiques agricoles sont en exploration (action 1.2.3, p.21). Envisager ces processus demande des analyses fines sur des cas d'étude locaux. En particulier, cette question se pose de façon très différente dans le gradient de polarisation qu'impose la proximité avec l'agglomération parisienne et son extension vers l'Ouest (Grand Paris, Axe Seine), avec (i) des territoires en voie d'urbanisation où l'agriculture résiste mais change de forme (le Plateau de Saclay) (ii) des territoires très spécialisés notamment en raison de la proximité de l'agglomération parisienne (la Brie); (ii) des territoires plus ruraux et au maillage urbain plus multipolaire où la polyculture-élevage semble subsister mais où ce maintien se fait aussi toutefois au prix d'une forme de spécialisation et de déconnexion au territoire local (région de Mirecourt). Un autre territoire (sur l'aire d'Alimentation de Captage, ville de Nangis) fera en outre l'objet de scénarios territoriaux avec une perspective rarement prise en compte au sein du PIREN-Seine, celle de restaurer les services écosystémiques face aux risques de pressions polluantes (nutriments, pesticides), inondations, perte de biodiversité en contexte de changement climatique.

Un des principaux points de résistance au changement du système agro-alimentaire réside dans le verrouillage socio-technique lié à la structure des filières d'approvisionnement, de transformation et de distribution (action 1.2.5, p.24). Leur évolution conditionne donc largement les possibilités de transition. La filière céréale, très ouverte sur l'international, est par exemple très structurante pour la céréaliculture.

Au total, l'ambition des travaux de ce bloc d'actions est la re-conception de territoires résilients et intégrés à leurs contextes socio-économiques. La place des mouvements citoyens et des acteurs, non seulement comme consommateurs exigeants, mais aussi comme agents actifs d'une transition écologique et solidaire, est donc centrale dans toute scénarisation de l'évolution du système agro-alimentaire. L'analyse de l'articulation des initiatives (portées par les villes et les collectivités territoriales, la société civile, les acteurs intermédiaires et même par le Ministère de l'Agriculture (cf. Loi d'avenir agricole) sera aussi déterminante. Il est important de noter que la construction de scénarios de transition à plusieurs échelles locales, prenant ainsi en compte les spécificités des zones urbaines et des zones rurales, sera portée à l'échelle du bassin de la Seine, et pour être crédible, devra à tout moment s'envisager à l'échelle nationale et européenne.

1.2.1 Variabilité et trajectoires climato-hydrologique du bassin de la Seine

Bien que les projections climatiques fournies par les approches multi-modèles (e.g. CMIP5) soient habituellement utilisées pour établir des scénarios d'évolution hydrologique à l'échelle régionale ou locale, les grands modes de la variabilité climatique interne n'y sont pas très bien restitués (Qasmi et al., 2017). Oscillant à différentes échelles de temps (infra-annuelles jusqu'à multi-décennales voire multi-séculaires), ces modes de variabilité de la circulation générale peuvent pourtant accentuer ou masquer les effets du changement climatique sur l'hydrologie régionale, mais également subir des modifications sous l'effet de ce changement. Pour cette raison, l'étude et la compréhension de la variabilité hydrologique à long terme, au moyen de reconstructions hydrométéorologiques ou bien des observations disponibles est cruciale, et fait l'objet d'une attention croissante depuis plusieurs années (Boé and Habets, 2014; Bonnet et al., 2017).



Une démarche innovante sera donc mise en place pour estimer la sensibilité des différents compartiments de l'hydrosystème Seine à la variabilité climatique à grande échelle, et de prédire l'évolution de leur bilan hydrique en fonction des différentes projections climatiques, afin de fournir une base crédible pour la construction de trajectoires urbaines, agricoles et écologiques.

La variabilité hydrologique est fortement contrainte par les propriétés physiques (hydrologiques et hydrogéologiques) des différentes zones de l'hydrosystème, qui opèrent un filtrage plus ou moins marqué des oscillations climatiques. Certains compartiments de la circulation générale peuvent en effet être affectés par des changements majeurs. C'est par exemple le cas de la circulation thermohaline dans l'Atlantique (circulation méridienne de retournement / AMOC), qui montre un ralentissement identifiable depuis quelques décennies (Caesar et al., 2018). Les liens physiques entre la dynamique d'une branche de l'AMOC (le Gulf Stream) et la circulation atmosphérique ont été étudiés entre autres par (Feliks et al., 2011), qui suggèrent que les oscillations d'échelle interannuelle du front du Gulf Stream produisent une variabilité aux mêmes échelles dans la circulation atmosphérique dans l'Atlantique nord (Oscillation Nord-Atlantique / NAO). Des échelles temporelles similaires caractérisent in fine les variations hydrologiques dans l'hydrosystème Seine (Massei et al., 2017).

L'objectif de cette action de la phase 8 est de proposer des trajectoires hydrologiques possibles de l'hydrosystème Seine en réponse à des changements de la variabilité climatique. Plus exactement, il s'agira de tester des scénarios d'impact de tels changements sur la réponse hydrologique dans le bassin (piézométrie, débits). A cet effet, il est ainsi proposé de travailler sur 1) la réduction des incertitudes relatives aux projections climatiques, pour 2) évaluer plus précisément les impacts de ces changements dans un second temps en termes de trajectoires et également d'extrêmes (pour les extrêmes cf. section 2.1.3, p. 33). Les recherches mèneront de front deux approches vouées à dialoguer ensemble, ayant pour objectif de dépasser la stratégie actuelle de recherche sur les impacts du changement climatique qui est basée sur un ensemble de projections dont la qualité n'est pas bien contrôlée, et qui rassemblées ensemble génèrent de très fortes incertitudes, et une difficulté à les interpréter.

La capacité des modèles à représenter les différentes fréquences de variabilité climatique sera ainsi explorée afin de sélectionner préférentiellement les sorties de modèle restituant des amplitudes réalistes de variabilité basse-fréquence. Parallèlement une approche originale sera testée, visant à modifier le contenu spectral des signaux d'entrée de précipitation et température sur la période historique (i.e. milieu à fin du 20^e siècle jusqu'à aujourd'hui), avant de les réinjecter dans le modèle Seine régional à l'aide de l'outil CaWaQS, dont les réponses seront analysées. Les résultats devraient ainsi aider à apprécier comment la variabilité climatique « naturelle » basse-fréquence s'exprime dans l'hydrologie et de quelle manière elle peut masquer ou accentuer des tendances liées au réchauffement global.

Ces informations seront alors mises en perspective de l'étude récente menée par le CECI pour le compte de l'AESN (Boé et al., 2018) pour mieux évaluer les risques de sécheresse (cf. section 2.1.3, p. 33) et anticiper l'éventuelle demande en eau relative aux scénarios agricoles.

Programme 2020 - 2021 :

Au cours des années 2020 et 2021, la modélisation à l'échelle régionale (CaWaQS) doit permettre dans un premier temps d'identifier différents secteurs en fonction de la variabilité hydrologique qui les caractérise (fonction de leurs propriétés physiques). Cette première étape a également pour objectif une recalibration du modèle Seine. Dans un second temps, le modèle régional sera utilisé pour estimer les réponses du bassin et de ses différents secteurs fonctionnels (i.e. secteurs ayant un

comportement homogène en termes de réponse à la variabilité climatique) à des changements de la variabilité climatique. Pour cette seconde étape, deux approches seront menées de concert afin de réduire les incertitudes liées aux projections climatiques. Les deux approches se focaliseront sur la période historique 1950-actuel, afin d’une part d’analyser les potentiels biais des modèles climatiques, notamment dans leur capacité à reproduire les processus climatiques basse fréquence, et d’autres part à traiter le signal climatique d’entrée (précipitations de la réanalyse SAFRAN) pour en modifier le contenu spectral selon certaines hypothèses : Feliks et al., (2011) montrent par exemple qu’une disparition de la variabilité interannuelle à interdécennale du front du Gulf Stream impliquerait une disparition de la variabilité de l’Oscillation Nord-Atlantique aux mêmes échelles temporelles. Ces variabilités étant très bien exprimées dans les signaux hydrologiques du bassin de la Seine, quelle serait la réponse hydrologique de ses différents secteurs fonctionnels en fonction de pareilles modifications de la variabilité climatique à grande échelle ?

La première année 2020 est en partie couverte par le projet *AquiVar*, financé par l’AESN, de sorte que des financements ne sont pas demandés pour les équipes concernées, à l’exclusion du CECI qui bénéficiera d’un soutien pour étudier la capacité des modèles climatiques à retranscrire la variabilité basse fréquence observée. Pendant cette période, le traitement du signal climatique consistera en premier lieu en une modification de l’amplitude de certaines composantes spectrales des précipitations de la réanalyse SAFRAN par décomposition multi-résolution en ondelettes. Le signal de précipitations ainsi modifié sera utilisé comme entrée dans le modèle, et le travail portera sur l’analyse des réponses hydrologiques de surface et souterraines simulées. Par la suite, dès 2021, le même type d’approche sera appliqué au champ de températures de la réanalyse SAFRAN. En effet, une simple modification des précipitations ne constitue pas une approche suffisamment réaliste de modification de la variabilité climatique ; le signal de recharge, notamment, devra faire l’objet d’une attention particulière. Ces premières modélisations seront interprétées à la lumière d’une expérience numérique qui permettra de mieux évaluer les erreurs relatives aux effets de processus basse fréquence dans les projections. A cet effet, toujours pour la période actuelle, un « bon » (i.e. restituant les basses fréquences) et un « mauvais » (i.e. ne restituant pas les basses fréquences) modèles climatiques, sélectionnés parmi ceux disponibles depuis l’exercice CMIP5, serviront à contraindre CaWaQS. Les écarts entre distributions statistiques des variables hydrologiques modélisées seront alors analysés. Le travail sera également décliné pour la caractérisation des évènements extrêmes dans le volet du programme dédié aux extrêmes (cf. section 2.1.3, p. 33).

Co-financement :

Le projet *AquiVar* financé par l’AESN assure le démarrage de cette action en 2020, notamment via le financement d’un post-doctorat.

1.2.2 Les pesticides : impact d’une crise sanitaire à venir

Malgré la mise en œuvre du plan Ecophyto en 2008 (puis 2018), l’utilisation des pesticides ne semble pas avoir diminué. Au contraire, selon différentes études, elle semble être repartie à la hausse. Pour analyser la trajectoire sur le temps long de l’usage des pesticides et comprendre son impact sur la qualité de des ressources en eau souterraine et superficielle, nous nous proposons de caractériser les pressions phytosanitaires à différentes échelles, du bassin versant de quelques centaines de km² (Orgeval), jusqu’au bassin de la Seine dans son ensemble, en remontant aussi loin dans le temps que possible, en mobilisant toutes les sources d’information disponibles. Ce travail méthodologique permettra de compléter la base de données ARSeiNE sur le volet « pesticides » afin d’alimenter la plateforme de modélisation PeSTICS-CaWaQS-RIVERSTRAHLER pour simuler le transfert des



pesticides vers les nappes et rivières. Cette modélisation permettra d'explorer des alternatives d'usages comme par exemple l'apparition d'une filière betterave bio (action 1.2.5, p.24), ou encore la mise en œuvre d'un plan Ecophyto renforcé avec obligation de réduire de 50% les usages de pesticides.

Programme 2020 - 2021 :

Les travaux à mener prioritairement en 2020 et 2021 nécessitent :

- de compléter l'inventaire des sources d'information sur les pratiques phytosanitaires disponibles/à mobiliser à l'échelle du bassin de la Seine, de réaliser une cartographie et une représentation spatiale et temporelle de l'évolution des pressions, et de mettre en place une méthodologie pour hybrider les connaissances et produire des données homogènes/continues mobilisables par le modèle PeSTICS (Queyrel et al., 2016). Une réflexion sera rapidement engagée sur la manière de renseigner l'usage des pesticides au cours de la période 1970-1990 qui n'est pas couverte par les données spatialisées. Après une priorisation et/ou définition du type des données sur les pratiques phytosanitaires à saisir dans la BD ARSEINE, en concertation avec les modélisateurs, la base de données sera adaptée pour être compatible avec le module PeSTICS, qui pourra être revisité dans ses formulations si nécessaire. Molécules déclassantes, le métolachlore et le diflufenicanil appartiennent à l'éventail des pesticides suivis.
- une amélioration de l'interfaçage entre le module PeSTICS et le modèle STICS afin de permettre son utilisation avec la nouvelle version de STICS. Des tests de sensibilité seront menés et les simulations seront validées sur des données existantes. La procédure de spatialisation PeSTICS-STICS- CaWaQS sera actualisée et les temps de calcul de l'application optimisés en prévision d'une utilisation à l'échelle macro-régionale du bassin de la Seine dans son ensemble, au-delà des petits territoires étudiés jusqu'alors (Gallois et al., 2018).
- Dans l'objectif d'une mise en œuvre de la plateforme de modélisation PeSTICS-CaWaQS-RIVERSTRAHLER du point de vue des pesticides, outre les nutriments et les gaz), des équations de transfert et transformation des pesticides dans la modélisation des eaux de surface seront implémentées dans RIVERSTRAHLER sur le bassin de l'Orgeval, dans un premier temps, mais avec un déploiement des simulations à l'échelle du bassin au cours de la phase 8. Les simulations seront confrontées à des concentrations mesurées en rivière pour validation. Les scénarios élaborés ci-dessus (tendanciels /de rupture et variantes) seront traduits en termes d'utilisation de pesticides (action 1.3.2, p.27).

Co-financement :

Une demande de bourse de thèse pourrait constituer une option importante pour une prise en charge de ces travaux à temps plein pendant 3 ans.

1.2.3 Dynamique du système agro-alimentaire des territoires-types du bassin de la Seine

Dans le bassin de la Seine, trois grands types de systèmes agro-alimentaires territoriaux seront pris en exemple

- des *territoires périurbains*, polarisés par la métropole parisienne où l'agriculture résiste mais change de forme. Le Plateau de Saclay est emblématique de ce type de situation, avec dominance des grandes cultures mais des initiatives de diversification plus ou moins récentes (maraîchage, petit élevage, agri-compostage) et une dynamique de conversion à l'AB et de commercialisation en circuits

courts soutenue par un rapprochement des agriculteurs avec la population locale (Tedesco et al., 2017).

- des *territoires* du bassin parisien *avec une agriculture très spécialisée vers les grandes cultures d'exportation* ; la Brie laitière en constitue un exemple type avec une spécialisation de l'agriculture vers les grandes cultures de rentes après l'abandon de l'élevage traditionnel (Garnier et al., 2016). Des problèmes aigus de contamination en nitrates et pesticides des ressources d'eau potable poussent à l'extension de l'agriculture biologique au développement de circuits courts et à la reconnexion avec l'élevage.

- des *territoires plus ruraux* où *la polyculture-élevage* semble subsister mais où ce maintien se fait aussi toutefois au prix d'une forme de spécialisation et de déconnexion au territoire local. La région de Mirecourt, représentant la frange périphérique du bassin de la Seine (Ardennes, Haute-Marne, Meuse), marquée par un fort déclin démographique, et des taux de pauvreté et de chômage importants, est dominée par des productions de masse à faible valeur ajoutée (lait, viande, céréales) destinées à l'agro-industrie générant peu de valeur ajoutée localement et ne contribuant que très peu à l'alimentation locale (Mignolet et al., 2018). Mais une dynamique institutionnelle et citoyenne se structure actuellement autour de la question agro-alimentaire, avec des objectifs d'autonomie, de diversification et de reconnexion à la consommation locale.

Programme 2020 - 2021 :

Cette action est complémentaire à l'étude du système alimentaire de la métropole parisienne (action 1.3.1, p.25) et bénéficiera des travaux sur les filières (action 1.2.5, p.24) et se décline en différentes étapes au cours des deux années 2020 et 2021 :

- Analyse du métabolisme agro-alimentaire des territoires retenus et du bassin de la Seine dans son ensemble avec une perspective historique en quantifiant les flux de N, P et C selon l'approche GRAFS (Billen et al., 2012; Le Noë et al., 2017);
- Analyse de la diversité des systèmes de production agricole et de leurs filières et circuits de commercialisation dans les territoires retenus par (i) l'exploitation de bases de données nationales : SitraM (Silvestre et al., 2015), Recensements Agricoles, RPG, répertoire SIRENE et (ii) la conduite d'enquêtes dans les territoires locaux ;
- Analyse du degré de connexion entre production agricole et consommation alimentaire locales dans les territoires locaux (Tedesco et al., 2017);
- Enfin, une mise en récit des initiatives portées par les acteurs des systèmes agro-alimentaires des territoires locaux sera réalisée.

Plusieurs types d'ateliers seront organisés au cours des deux années 2020 et 2021 : i) un atelier méthodologique inter-équipes de recherche pour une convergence des approches sur les trois territoires ; ii) des ateliers entre les chercheurs et les acteurs dans chacun des territoires et iii) un atelier croisant et rassemblant les différents territoires.

Co-financement :

Cette triple action a fait l'objet d'un soutien dans le cadre de l'initiative Mutalim (INRA-CNRS) de sorte que les ateliers et entretiens supplémentaires pourront être financés. .



1.2.4 Restaurer les services écosystémiques à l'échelle d'un territoire de la Brie : ANCOEUR 2030.

Dans la continuité de la démarche participative appliquée au territoire de l'Ancoeur (Seine-et-Marne, 230km²) dans le cadre du projet Brie'Eau (Tournebize et al., 2018), nous proposons de développer des approches de scénarii territoriaux à l'échelle locale pour restaurer les services écosystémiques face aux risques de pressions polluantes (nutriments, pesticides), inondations, perte de biodiversité en contexte de changement climatique : ANCOEUR 2030. C'est un projet ambitieux de reconstruction d'un territoire résilient et intégré à son contexte socio-économique. Actuellement, plusieurs démarches sont en cours notamment sur le volet Aire d'Alimentation de Captage (ville de Nangis) et sur un meilleur partage des connaissances de la nappe de Champigny. En parallèle, ce territoire est sélectionné pour être un des 10 territoires démonstrateurs à l'échelle nationale dans le cadre du projet Life ARTISAN (pilote par l'AFB, soumission prévue courant 2019). Ce projet a pour objectif de développer concrètement des solutions fondées sur la nature face au défi de l'adaptation au changement climatique.

Dans le cadre du PIREN-Seine, les services écosystémiques ainsi étudiés porteront sur la capacité des écosystèmes à réguler la quantité et la qualité de l'eau, les flux de carbone ainsi que le climat (par l'activité écophysologique de la végétation), mais aussi le maintien de la biodiversité par la restauration d'habitat (plusieurs taxons aquatiques et terrestres seront étudiés) et de connectivité des espaces. Les zones tampons, éléments du paysage, (haie, bande enherbée, ripisylve, bosquet, prairie permanente, zone humide) apparaissent comme un levier d'aménagement du territoire. L'approche comprendra aussi un volet agricole en améliorant les scénarii agricoles Coclick'eau du projet Brie'Eau (évolution des cultures sous contrainte de changement climatique). Ces éléments contribueront à proposer une approche optimisant l'occupation du sol

Programme 2020 - 2021 :

Au cours de l'année 2020, l'étude portera d'abord sur l'évaluation des services écosystémiques en se basant sur les recommandations de l'EFESE (Devaux and Heller, 2018), et de leurs évolutions sous contrainte de changement climatique avec un stage de Master 2. En 2021, sous réserve de l'acquisition d'une demi-bourse de thèse, un outil croisant les services écosystémiques sera développé avec une perspective de hiérarchisation des sites potentiels. L'étape suivante sera l'intégration des scénarios agricoles à partir de la version Coclick'eau Brie'Eau (en développant l'agriculture de conservation, les zones tampons), et de gestion de l'occupation du sol.

En termes de résultats, il s'agit *in fine* de proposer une démarche de résilience intégrant aussi bien l'activité économique des territoires agricoles et la préservation des milieux naturels, sous contrainte de changement appliquée dans un premier temps à un territoire local, mais pouvant être généralisable à plus large échelle.

Co-financement :

Ce projet bénéficie d'un ½ financement bourse de thèse via l'Institut Convergence CLAND. Une recherche est engagée pour trouver une autre ½ bourse.

Un projet complémentaire est en cours de soumission et piloté par l'AFB (Projet Life ARTISAN), pour le financement des actions de restauration sur le territoire de l'Ancoeur (travaux, animation).

Une autre bourse de Master sera demandée en 2021 à la FIRE (Fédération Île de France de Recherche en Environnement).

1.2.5 Les filières de transformation agro-alimentaire : lieu de verrouillage socio-technique ou moteur de changement ?

Les filières de transformation agro-alimentaire n'ont pas fait, jusqu'ici, l'objet de beaucoup de travaux d'écologie territoriale dans le cadre du PIREN-Seine. Elles constituent pourtant un maillon essentiel des systèmes agro-alimentaires. Leur importance comme débouché souvent monopolistique des productions agricoles en font un aspect essentiel de toute transformation de l'agriculture. Leur poids économique et la lourdeur de leurs infrastructures peuvent contribuer largement au verrouillage socio-technique du système. A contrario, un changement décidé par un acteur majeur d'une filière peut être un puissant moteur de changement de tout le système agricole. Il en est ainsi des filières liées aux cultures énergétiques dont l'importance est croissante dans le bassin.

L'objectif de cette action est d'étudier selon cet éclairage quelques-unes des principales filières agro-alimentaires d'importance pour l'agriculture du bassin de la Seine, de retracer leur trajectoire historique et d'étudier les tendances de leur évolution future. Ce travail sera réalisé sur des modèles déjà éprouvés pour l'Île-de-France (Petit, 2014) à travers la bibliographie et l'étude des sources historiques disponibles, complété par des entretiens auprès d'acteurs industriels.

Programme 2020 - 2021 :

Les travaux des années 2020 et 2021 seront essentiellement réalisés avec des stagiaires qui se consacreront successivement à l'une ou l'autre filière :

- La filière de transformation et de commercialisation des céréales sera étudiée en priorité ; il s'agira de mettre en évidence les déterminants de sa très grande ouverture sur l'international.
- La filière du sucre et de l'éthanol, qui détermine largement la culture de la betterave et la possibilité de sa conversion à l'agriculture biologique, sera également étudiée. Nous chercherons à analyser l'impact sur le secteur betteravier (et sur d'autres par un effet cascade : le blé par exemple), d'initiatives telles que la mise sur le marché de « sodas bio ».

La filière des oléagineux, et plus généralement celle des biocarburants de première et seconde générations, de même que celles des légumes de plein champs, ou encore les débouchés du lait pourraient être également étudiées au cours de cette phase 8. Les cultures dédiées, en tout ou en parties, aux filières de méthanisation seront aussi documentées.

Co-financement :

Deux bourses de masters seront demandées, l'une à la Fédération FIRE (Fédération Île de France de Recherche en Environnement), une autre à l'INRA. En fonction des résultats obtenus par les stagiaires et leurs encadrants, un financement complémentaire sera demandé en élaborant des projets pour répondre à des appels d'offre.



BLOC 1.3. Des scénarios à la croisée des territoires et des politiques

Historiquement, les réflexions prospectives du PIREN Seine sur les systèmes agricoles ont porté sur des scénarios contrastés centrés sur des variables biotechniques (systèmes de cultures et d'élevage), et dont les variables de sortie étaient principalement des flux de nutriments (azote, phosphore, silicium). Si les liens entre les dynamiques urbaines et les dynamiques du système alimentaire du bassin — avec ses composantes agricoles — commencent à être pensés et articulés au sein du PIREN, ils restent à être complétés et approfondis.

La contribution au débat socio-politique pour contribuer à un socio-écosystème durable et résilient constitue la focale du bloc, en se concentrant sur les systèmes alimentaires et le métabolisme urbain. Plus précisément, l'enjeu est de construire des scénarios qui éclairent les enjeux de l'ensemble des gestionnaires du bassin, qu'ils interviennent selon des logiques sectorielles (gestion de l'eau, des risques, de l'agriculture, des transports, du métabolisme urbain et des politiques biogéochimiques...) et/ou territoriales. A cet effet il conviendra, d'une part, de mieux articuler les recherches engagées et de les compléter pour renforcer la compréhension de la co-évolution des systèmes humains et bio-physico-chimiques, et d'autre part, de mieux articuler ces recherches avec les cercles de débats (académique, politique, médiatique et société civile) influençant la transition socio-écologique visée. Les enjeux socio-écologiques devront également être traduits précisément d'une manière qui fasse sens pour un large public, et notamment celui des porteurs d'enjeux. Ils devront aussi être traduits en termes de modélisation pour une évaluation environnementale quantitative. Cette exigence invite à élargir les thèmes d'analyse, outre les nutriments, aux pesticides, aux gaz à effet de serre, aux paysages, à la gestion des risques de différents ordres par exemple, il s'agit ainsi d'intégrer des variables d'intérêt pour les différentes parties prenantes.

Au total, la pertinence et la signification des trajectoires de transition envisageables doivent donc être analysées plus en profondeur sous l'angle de leur crédibilité et de leur cohérence, des verrouillages auxquels elles renvoient, et de leurs conséquences socio-écologiques.

1.3.1 Scénarios du système alimentaire de la métropole parisienne en transition : flux, acteurs, politiques et territoires

Cette action envisage le système alimentaire de l'agglomération parisienne comme s'étendant de la production agricole qui contribue à nourrir les Parisiens aux excréta qui en résultent, en passant par l'approvisionnement, la commercialisation et la consommation des produits. Il s'agit donc, par rapport aux phases précédentes, d'une vision plus complète de ce système (avec l'intégration des excréments, qui a débuté en phase 7), à laquelle on intègre plus de complexité en prenant en compte la diversité des profils de consommateurs.

Sur la base d'analyses du métabolisme urbain (ici limité aux flux d'approvisionnement alimentaire (Bognon, 2014) et d'excrétion (Esculier et al., n.d.)), cette action vise : 1) à mieux caractériser ce système et à identifier les foyers d'innovation qui le caractérisent et le lien entre profils de consommation et flux de matières ; 2) à scénariser les futurs possibles du système alimentaire et de son organisation grâce notamment à une collaboration chercheurs-acteurs ; 3) à éclairer le débat sur la transition socio-écologique en contribuant à définir les conditions de celle-ci dans le cas du système alimentaire (Barles, 2017). Il s'agit ainsi tant de caractériser la situation actuelle que de s'engager dans une démarche prospective.

L'étude du système alimentaire de l'agglomération parisienne aujourd'hui s'appuiera sur la représentation spatialisée des flux métaboliques du système alimentaire avec la méthodologie GRAFS (Generalized representation of agro-food systems, (Esculier et al., n.d.; Le Noë et al., 2017)) qui permet de formaliser dans une structure cohérente, les flux de nutriments associés au système alimentaire dans un territoire donné.

Les pratiques sociales de l'alimentation seront analysées par la caractérisation des liens entre les différentes catégories sociales et les types de pratiques alimentaires par une approche statistique afin d'aider à la scénarisation.

On déclinera ainsi la méthode GRAFS en fonction de socio-types de façon à mieux comprendre les liens existant entre pratiques alimentaires et flux de matières, ce qui est une avancée majeure par rapport aux travaux précédents, qui ne différenciaient pas les profils de consommation mais s'en tenaient à un urbain moyen en ce qui concerne la prise en compte de la demande alimentaire. Dans la perspective de la transition et de la scénarisation, cette compréhension est essentielle.

Parallèlement, une analyse d'expériences innovantes ou alternatives au modèle dominant (foyers d'innovation) contribuera à la compréhension des conditions du changement du point de vue de l'offre alimentaire. Des cas d'études sont envisagés : par ex. SIRESCO (syndicat pour la restauration collective conduisant une politique de reterritorialisation de la fonction alimentaire), coopératives de consommateurs (en particulier La Louve à Paris), Mairie de Paris, PAT du plateau de Saclay, réseaux de magasins bio (type Biocoop et sa stratégie d'approvisionnement local), expériences de récupération des urines...

Une analyse des enjeux prospectifs du système alimentaire sera menée par une identification et un examen des questions posées dans les débats portés par les acteurs sociaux et politiques autour de l'évolution du système alimentaire. Les pistes envisagées et les arguments favorables et défavorables seront hiérarchisés. Cette analyse alimentera les réflexions sur les prises pour l'action que pourraient fournir les scénarios élaborés dans cette action.

Sur la base de l'analyse du système alimentaire de l'agglomération parisienne et des deux scénarios prospectifs contrastés du système agro-alimentaire français construits lors de travaux de la phase 7 ('Ouvert et Spécialisé', O/S, et 'Autonome, Reconnecté, Demitarrien' A/R/D) (Billen et al., 2018), de nouveaux scénarios seront déclinés et formalisés. Ces scénarios seront mis en débat à différentes échelles, celle de l'agglomération parisienne dans son ensemble et à l'échelle de sous-ensembles (en lien, avec les foyers d'innovation). Une évaluation de leurs besoins en matières premières et en énergie, et des modifications induites au niveau des filières agro-alimentaires sera effectuée en vue d'une quantification de leurs conséquences environnementales (action 1.3.2, p.27).

Programme 2020 - 2021 :

Les travaux des années 2020 et 2021 seront au moins menés avec des stagiaires (2 ou 3) sur i) les nouvelles formalisations dans GRAFS, ii) les pratiques sociales de l'alimentation et iii) les foyers d'innovation. Un premier séminaire sera réalisé si possible dès la première année pour rassembler les acteurs, d'ores et déjà contactés pour leur participation.

Co-financement :

Une demande de financement sera déposée à l'ADEME dans le cadre de l'APR GRAINE. Le projet nécessite en effet le financement d'un post-doctorat de deux ans.



1.3.2 Évaluation environnementale des scénarios à l'échelle du bassin

Les deux scénarios contrastés à l'échelle du bassin de la Seine et de la France construits lors de la phase précédente du PIREN, envisagent i) la poursuite de la trajectoire d'ouverture et de spécialisation de l'agriculture, ou ii) une rupture radicale vers l'autonomie en intrants des exploitations, la reconnexion de l'agriculture et de l'élevage et une transition alimentaire vers moins de produits animaux. Les deux scénarios ont été construits à l'aide du modèle GRAFS pour un jeu d'hypothèses cohérentes mais en partie arbitraires. Ces hypothèses seront affinées et diversifiées, et le curseur pourrait être déplacé autour de ces hypothèses centrales. L'interaction avec les politiques énergétiques sera davantage pris en compte, tant en ce qui concerne la montée en puissance des cultures énergétiques (agro-carburants, méthanisation,...), que les efforts de séquestration de C dans la biomasse et les sols (reforestation, accroissement du C organique des sols agricoles,...). Les effets de l'évolution du régime alimentaire humain seront étudiés plus finement en considérant un gradient de proportion de produits animaux dans la consommation totale, allant jusqu'à l'extrême cherchant ainsi à montrer la soutenabilité ou non des systèmes agricoles associés. L'effet de la généralisation du recyclage des excréta humains selon diverses options (du traitement centralisé à la collecte sélective) recevra une attention particulière. La spatialisation des scénarios dans une hypothèse de définitions de territoires réservés (AAC, PNR), pourrait aussi être étudiée plus finement.

Les démarches de scénarisation vont intégrer des éléments de re-conception agricole adaptés au changement climatique, prenant en compte les éléments de caractérisation des risques étudiés, et les chroniques « sécheresse » élaborées par le CERFACS pour l'AESN (Boé et al., 2018) au regard des scénarisations climatiques de l'action 1.2.1, p.18. Il s'agirait non seulement de mettre en évidence les limites d'un scénario basé sur l'extension de l'irrigation comme initié par (Viennot and Gallois, 2017), mais aussi de concevoir, si possible de manière participative par le biais d'un atelier associant agriculteurs et associations environnementales, un scénario d'adaptation de l'agriculture au risque de sécheresses, et d'en quantifier les performances à l'aide des modèles disponibles. Une hypothèse de travail étant au total d'irriguer moins, mais mieux, dans le cadre d'un scénario "bio" par rapport au système actuel (Gallois and Viennot, 2018).

Tous les scénarios traduits en terme d'hypothèses de modélisation seront évalués avec la plateforme de modélisation (PeSTICS)STICS/GRAFS-CaWaQS-pyNuts-RIVERSTRAHLER en termes de conséquences environnementales sur les sols (séquestration de P et de C), sur l'hydrosystème (contamination azotée et en pesticides, eutrophisation) et sur l'atmosphère (émissions de gaz à effet de serre) :

- Évaluation de l'effet des scénarios sur la qualité de l'hydrosystème. Il s'agit de traduire les scénarios en données d'entrées soit directement pour le modèle GRAFS-PyNuts-RIVERSTRAHLER, soit pour la chaîne de modélisation (PeSTICS)STICS/CaWaQS – PyNuts-RIVERSTRAHLER –C-GEM ou MARS3D de manière à en évaluer l'effet en termes de qualité de l'hydrosystème dans toutes ses composantes, si possible jusqu'à la zone côtière.
- Évaluation de l'effet des scénarios sur les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre. La mise en œuvre du modèle GRAFS pour chacun des scénarios envisagés permet d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre (CH_4 , CO_2 , N_2O) qui en résultent via l'agriculture (Garnier et al., 2019). En ce qui concerne le N_2O , l'algorithme empirique utilisé pourra être amélioré.
- Évaluation de la place du bassin dans les échanges nationaux, européens et mondiaux. Chaque scénario devra faire l'objet d'une analyse des conséquences qu'il implique en termes d'échanges de produits agricoles et de ressources fertilisantes avec le reste du territoire national, l'Europe et le monde. Ceci conduira à insérer l'analyse GRAFS du bassin de la Seine dans celle de la France, de l'Europe et du monde. Les développements requis à cet égard

sont déjà en partie disponibles, sauf en ce qui concerne le niveau européen qui fera donc l'objet de travaux particuliers. Les approches GRAFS- CaWaQS PyNuts-RIVERSTRAHLER et STICS- CaWaQS PyNuts-RIVERSTRAHLER seront confrontées sur le bassin de la Seine.

Programme 2020 - 2021 :

Les travaux des années 2020 et 2021 feront l'objet d'analyses des bases de données (distribution, consommation,...), de mise à jour de l'outil GRAFS en amont pour accueillir une plus grande variété de scénarios, et de son couplage avec la plateforme de modélisation (actions du BLOC 1.1, p.14). Les scénarios seront simulés à mesure de leur co-construction (action 1.3.1, p.25) pour quantifier les impacts environnementaux et ainsi pouvoir revoir les hypothèses selon des objectifs environnementaux souhaités.

Co-financement :

Deux stages de M2 sont proposés sur ces évaluations.

Une bourse de thèse est demandée dès 2019 à GRNE, pour la modélisation des continuums aquatiques rivières/réservoirs/estuaires (et de la Seine en particulier), incluant le modèle RIVE unifié mais aussi s'inscrivant dans la logique de scénarisation du devenir du continuum homme-terre-mer.



2. Axe 2 : Fonctionnement du bassin soumis à des extrêmes hydro-climatiques (A. Rivière, V. Thieu)

Si l'éventail des projections climatiques reste encore assez large, les modèles de climat s'accordent aujourd'hui pour le bassin de la Seine sur une augmentation de la fréquence et/ou de l'intensité des extrêmes climatiques (température de l'air et précipitation) (Dayon et al., 2018). L'objectif de cet axe sera de quantifier les impacts de ces extrêmes climatiques sur la disponibilité et la vulnérabilité des ressources en eaux et leurs usages, la qualité des milieux aquatiques et les peuplements piscicoles et sur les risques encourus par les différentes activités humaines (infrastructures, aménagement, agriculture,...).

Les impacts *directs* sur le cycle de l'eau et sur le fonctionnement thermique du bassin de la Seine seront décrits par différentes méthodologies dont des mesures de terrains, des analyses fréquentielles et des modèles numériques couplant les transferts d'eau et de chaleur depuis l'atmosphère jusqu'aux aquifères en passant par les rivières, le sol et la végétation. Les événements climatiques extrêmes se traduisent par une modification du stock et des flux d'eau et d'énergie et un temps de remise à l'équilibre. Ces réponses sont modulées par les propriétés physiques de l'hydrosystème, la période de l'année ainsi que les rétroactions entre la surface et l'atmosphère. L'évolution comparée d'indicateurs de sécheresse et d'évolution de la température et leur lien avec la variabilité climatique seront analysés. Une spatialisation des zones de risques et des réponses hydrodynamiques et thermiques de l'hydrosystème Seine seront produites grâce aux différentes analyses. Les flux d'eau et de chaleur sont des facteurs déterminants de la qualité biogéochimique et écologique des cours d'eau. Dans un second temps, les *effets induits* par les réponses hydrodynamiques et thermiques sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques seront analysés (on parlera alors d'*impact indirect*).

Les outils qui seront développés ou améliorés durant cette Phase 8 (notamment au travers de couplage) permettront de proposer une chaîne de modèles dits « d'impact », capable d'évaluer en cascade les effets directs et indirects de façon opérationnelle et d'évaluer des scénarios complexes de gestion ou d'exploitation de la ressource en eau impliquant l'ensemble des partenaires scientifiques/gestionnaires/utilisateurs. Ces outils permettront également de converger vers une description du fonctionnement passé et à venir du socio-eco-système Seine face aux extrêmes hydro-climatiques.

BLOC 2.1. Les impacts directs des extrêmes climatiques sur le cycle de l'eau et les transferts d'énergie au sein de l'hydrosystème Seine

Les projections climatiques font redouter, en fonction de leur ampleur, des conséquences d'étiages sévères, des périodes de canicule sur le bassin de la Seine ainsi qu'une plus grande fréquence des pluies fortes, pouvant donner lieu à des inondations par ruissellement ou par remontée de nappe (Dayon et al., 2018). Les activités économiques sont vulnérables aux événements extrêmes; que ce soit (i) par inondation des infrastructures en zone urbaine ou des cultures en zone rurale, (ii) par la dégradation de la qualité des milieux aquatiques, (iii) par modification des propriétés productrice des sols ou par évolution du potentiel thermique de l'eau. Une compréhension de toutes les composantes du bilan hydrique est indispensable pour élaborer des mesures de gestion rationnelle et durable de la ressource en eau intégrant les événements extrêmes tels que les sécheresses, inondations, vagues de chaleur de froid ou de sécheresse, orages, longues périodes de températures élevées hivernales, variations brutales de la température de l'air.

L'effet de ces extrêmes sur le fonctionnement à court, moyen, et long terme du système est mal connu ne serait ce que du point de vue hydrologique. Les conséquences des perturbations de la température des eaux le sont encore davantage. Afin d'améliorer notre compréhension de ces effets sur le bassin de la Seine, un outil simulant les transferts d'eau et d'énergie depuis l'atmosphère jusqu'aux rivières et aux eaux souterraines, en tenant compte explicitement de la végétation et du sol, sera développé. Cet outil permettra également d'étudier les rétroactions entre le climat et l'état des sols et des nappes, ainsi que leurs incidences sur la spatialisation, l'intensité et la durée des réponses hydrique et thermique de la Seine face aux événements extrêmes. Les réponses des différents compartiments de l'hydrosystème seront caractérisées et testées au travers de différents scénarios climatiques en s'appuyant sur un socle d'indicateurs communs aux différentes actions.

2.1.1 Trajectoires et extrêmes hydro-thermiques

Les rapports du GIEC montrent une augmentation certaine de la température de l'air liée aux changements globaux. Ces variations se traduisent par des modifications du fonctionnement hydrologique et thermique des différents compartiments de l'hydrosystème. La gestion durable des ressources en eau, tant du point de vue de leur disponibilité, que de leurs qualités physico-chimique, thermique et écologique, en passant par leur potentiel de production d'énergie et leur importance pour la production agricole, sera sous-tendue dans le futur par notre capacité à anticiper les effets du changement climatique, l'évolution des demandes, et les nouveaux systèmes de gouvernance relatifs à la gestion des milieux anthropisés (gestion des infrastructures, politiques de développement territorial). Cette action a pour objectif de doter le PIREN Seine d'un outil performant de simulations des rétro-actions hydrologiques et thermiques entre l'atmosphère et les milieux continentaux anthropisés. Le développement d'un tel outil précisera les représentations du cycle de l'eau en rendant compte des forçages climatiques et quantifiera la variation spatiale du flux d'énergie au sein des milieux soumis aux changements globaux (climatiques et sociétaux). Les résultats de cette action permettront de caractériser les fonctionnements hydrologique et thermique de chaque compartiment de l'hydrosystème Seine (rivière, plan d'eau, aquifère,) ainsi que les flux d'échange au travers de leurs interfaces (nappe-rivière, sol,...). Cet outil servira de support à de multiples activités de la phase huit, aussi bien pour évaluer les impacts indirects des changements globaux, concernant la réactivité biogéochimique de l'interface nappe-rivière (action 2.2.2, p.37) et l'évolution des



habitats et de la diversité des populations piscicole (action 2.2.3, p.37), que pour les scénarisations prospectives du futur du système agro-alimentaire de la Seine déclinées par l'action 1.3.2, p.27.

Une synthèse des différentes acquisitions de mesures de température et de conductivité thermique dans les différents compartiments du bassin de la Seine (les différents aquifères et aquitards, sol, plaines alluviales, interface nappe-rivière, rivières et plan d'eau) est nécessaire afin de réaliser des simulations à l'échelle de l'hydrosystème Seine. Cette base de données sera mise en place dans la continuité de celle fournie par William Thomas (DRIEE) sur les températures de l'air et de l'eau des rivières du bassin. Cette base sera complétée par des données de températures dans les différentes couches aquifères et aquitards ainsi que dans les plaines alluviales en utilisant les travaux réalisés sur le bassin de Paris, ainsi que par le PIREN Seine, notamment sur les deux sites ateliers de l'Orgeval, et de la Bassée, où des suivis en continu sont en place aux stations MOLONARI (Flipo et al., 2016; Mouhri et al., 2013) depuis plusieurs années (Rivière et al., 2018). Une première estimation des régimes thermiques de l'hydrosystème sera réalisée par une analyse statistique complète de cette base de données.

En vue de modéliser l'état thermique des différents compartiments, un couplage entre un modèle de transport d'eau et de chaleur entre l'atmosphère et le sol en passant par la végétation (ORCHIDEE, IPSL (Krinner et al., 2005)) et la plateforme intégrée des écoulements d'eau de surface et souterrains et du transport de chaleur (CAWAQS, Mines ParisTech (Labarthe, 2016)) est en cours de développement sur le bassin expérimental des Avenelles afin d'être déployé dans un second temps sur l'ensemble du bassin de la Seine. La base de données qui sera développée dans ce projet apportera les forçages ainsi que les données nécessaires à la calibration des paramètres thermiques de ce méta modèle. Les résultats de simulation permettront d'obtenir une cartographie hydro-thermique fonctionnelle des masses d'eau et une évaluation de sa sensibilité aux changements globaux. En fin de phase, les rétroactions vers le climat par le biais de la reprise évaporatoire de l'eau des sols et des nappes très superficielles seront étudiées conjointement avec l'action 2.1.2, p.32.

Programme 2020 - 2021 :

Les travaux des années 2020 et 2021 seront déclinés en quatre étapes :

- Les données thermiques du bassin de la Seine (températures des aquifères, rivières, de la ripisylve, des plans d'eau, des plaines alluviales et les propriétés de conduction de la chaleur par les différents milieux) seront collectées dans une base de données.
- Une synthèse du fonctionnement thermique des différents compartiments de l'hydrosystème Seine sera réalisée à partir de cette base de données en mettant en place des indicateurs des différents événements extrêmes.
- Un module du bilan d'énergie en rivière en prenant en compte les échanges avec l'atmosphère sera développé. Celui-ci précisera les effets de l'ombrage de la végétation des berges.
- La première application Seine ORCHIDEE-CAWAQS sera développée sans la prise en compte des rétroactions du sous sol sur les processus de surface et atmosphérique (sans rétroactions de CAWAQS vers ORCHIDEE), puis calibrée à l'aide de la base de données, d'une part, et également des données thermiques qui seront acquises dans la plaine de la Bassée (action 3.2.1, p.46).

Ensuite, les performances des simulations du cycle de l'eau, principalement l'humidité de la surface des sols et de l'évapotranspiration réelle, avec la prise en compte des évolutions thermiques seront analysées pour améliorer le couplage entre ORCHIDEE et CAWAQS en tenant compte des rétroactions liées aux états de surface des sols et des nappes. Celui-ci sera évalué par l'utilisation de

produits issus de l'imagerie satellitaire à l'échelle du bassin de la Seine. Les corrélations entre les images thermiques obtenues par drone et les images satellitaires seront utilisées et extrapolées à l'ensemble du bassin de la Seine afin de raffiner la calibration thermique des compartiments de l'hydrosystème proches de la surface.

Co-financement :

Une bourse de thèse de doctorat (Deniz Killiç) est financée depuis octobre 2018 par MINES ParisTech au sein de l'Ecole doctorale GRNE, pour la mise en place de l'outil de couplage entre CAWAQS et ORCHIDEE. Le projet CONSACRE CPIER Vallée de Seine (2018-2021) a permis de financer un post doctorat dont l'objectif est de développer le transfert d'énergie entre l'atmosphère et la surface d'eau libre de la rivière en prenant en compte les effets d'ombrage. Un projet complémentaire sera demandé à l'AFB afin de caractériser le lien entre les extrêmes thermiques avec le fonctionnement écologique.

2.1.2 Rétroactions des eaux souterraines sur le climat

De nombreuses études ont montré l'impact des conditions de surface sur le climat, et notamment sur les extrêmes, via des processus complexes impliquant des rétroactions entre surface et atmosphère (qui peuvent amplifier ou atténuer les impacts directs). Ces effets se manifestent à différentes échelles spatio-temporelles, par exemple les canicules estivales en Europe sont favorisées par les sécheresses printanières (Berg et al., 2016); les couplages surface-atmosphère contribuent à expliquer la tendance planétaire à des continents plus arides au 21ème siècle qu'à l'actuel (Quesada et al., 2012).

Ces effets restent cependant mal compris, car difficiles à mettre en évidence à partir d'observations, et peu étudiés par la modélisation. L'objectif de cette action sera ainsi d'explorer l'effet sur le climat (passé et futur) de facteurs de contrôle importants des rétroactions surface - atmosphère, à savoir les eaux souterraines, très prégnantes dans le bassin de la Seine. Elles sont susceptibles d'augmenter l'humidité des sols, donc l'évaporation, ce qui rafraîchit l'atmosphère et favorise les précipitations. Ce processus très particulier est difficile à appréhender avec des données uniquement, aussi nous semble-t-il opportun de l'explorer par modélisation à base physique, et de nous assurer qu'ils sont correctement pris en compte dans les outils de modélisation servant à étudier les trajectoires du système sous hypothèse de changements globaux. Par ailleurs les effets inertiels liés aux eaux souterraines seront quantifiés, afin de mieux anticiper leurs rétroactions complexes avec la variabilité saisonnière et pluriannuelle du climat, et des effets potentiels sur les extrêmes hydrologiques.

A plus long terme, une question importante est de savoir si et comment le réchauffement et l'aridification continentale projetés au 21ème siècle peuvent être modifiés par les rétroactions avec les eaux souterraines. On peut notamment imaginer qu'elles puissent atténuer les manifestations d'aridification/réchauffement dans un premier temps, avec une bascule plus ou moins brutale quand les ressources en eau deviendraient insuffisantes pour continuer à jouer leur rôle actuel, si bien que l'aridification et le réchauffement seraient alors non plus tamponnés mais amplifiés par les rétroactions surface-atmosphère. Ce travail permettra d'avoir une nouvelle perspective sur les incertitudes des projections climatiques "classiques" qui négligent l'impact de ces rétroactions sur le climat.



Programme 2020 - 2021 :

Ces extrêmes seront notamment analysés en mobilisant les indicateurs d'intensité-durée-fréquence-localisation. En liens étroits avec l'action 1.2.1, p.18, des méthodes d'exploration du contenu spectral seront également mises en œuvre pour identifier les modes de variations des extrêmes et l'éventuelle modification de leurs amplitudes en fonction des facteurs de contrôle pris en compte (e.g. amplification ou non du cycle annuel, occurrence d'années successives, voire de décennies plus ou moins sèches, chaudes ou humides que la normale).

En 2020-2021, nous mettrons en place le modèle couplé surface-atmosphère d'extension planétaire, tout en zoomant sur la France et le bassin de la Seine (résolution d'environ 30 km). Ce modèle inclura une description des eaux souterraines simplifiée, déployée à l'échelle globale (F. Wang et al., 2018). Les résultats seront analysés en rétrospectif (possibilité de contraindre les vents observés pour obtenir un climat simulé suffisamment réaliste et suffisamment sensible aux conditions de surface pour que la comparaison à des observations météorologiques ou hydrologiques soit informative (Campoy et al., 2013)), et en prospectif (forcé par les scénarios de forçage radiatif utilisé pour les nouvelles projections CMIP6). Le calibrage module d'eau souterraine sur le bassin de la Seine sera probablement nécessaire avant d'étudier l'impact de ces facteurs sur les extrêmes passés et futurs.

Le couplage ORCHIDEE-CAWAQS développé dans l'action 2.1.1, p.30, permettra ensuite d'améliorer le réalisme de ces simulations et d'approfondir l'analyse des résultats à l'échelle du bassin de la Seine, faisant ainsi écho aux simulations prospectives des futurs de l'agro-système réalisées dans l'action 1.3.2, p.27. L'analyse du contenu spectral des séries simulées permettra notamment de vérifier dans quelle mesure les grandes oscillations d'origine climatique (e.g. interannuelles à inter-décennales) sont restituées dans les simulations rétro- et prospectives, et dans quelle mesure la gestion des eaux souterraines influencent ces modes de variabilité.

Co-financement :

Cette action repose sur les travaux menés depuis plusieurs années sur la modélisation des eaux souterraines dans le modèle ORCHIDEE couplé au modèle atmosphérique de l'IPSL, avec des financements qui se termineront en 2019 (projet ANR IGEM : Impact of Groundwater in Earth system Models ; thèse d'Ardalan Tootchi soutenue par la région Ile de France).

Un co-financement certain sera constitué par l'infrastructure de calcul offerte par l'IPSL et les heures de calcul demandées sur les super-calculateurs nationaux (demande annuelle). D'autres cofinancements seront cherchés par ailleurs : EUR (École universitaire de recherche) IPSL pour 1 an de post-doc (ciblé en 2022, sur le couplage ORCHIDEE-CAWAQS) ; bourse de thèse MESRI.

2.1.3 Extrêmes piézométriques et sécheresses hydrologiques dans l'hydrosystème Seine

Dans le bassin de Seine, de nombreux piézomètres montrent des comportements dominés par une variabilité basse-fréquence interannuelle à interdécennale. Cette variabilité d'origine climatique est modulée par les propriétés locales des bassins et par les prélèvements. Elle peut être associée aussi bien à des inondations par remontée de nappe qu'à des sécheresses hydrologiques.

La caractérisation des comportements piézométriques du Bassin de Paris, de leur évolution dans le temps, l'établissement d'une typologie et la distribution spatiale associée ont déjà été réalisés dans le

cadre de précédents projets. L'objectif de cette action est de concentrer l'effort sur les extrêmes hydrologiques souterrains et de surface, en particulier les étiages sévères et sécheresses hydrologiques issues des étiages de nappes. Il s'agira plus précisément :

- de caractériser les relations, d'un point de vue statistique, entre niveaux extrêmes de nappe et extrêmes hydrologiques de surface (minima et maxima) : liens entre les deux types de processus, fréquence d'occurrence, évolution à long terme ;
- d'étudier l'éventuelle dépendance des extrêmes de surface ou souterrains à la variabilité climatique à grande échelle (test de modèles d'extrêmes non-stationnaires avec indicateurs ou champs climatique en co-variable). Parmi les hypothèses à tester, les liens avec la variabilité de la circulation atlantique méridienne de retournement (AMOC), l'oscillation nord-atlantique (NAO) et les champs atmosphériques ou océaniques (pression au niveau de la mer, géopotentiels, température à la surface de la mer) seront explorés ;
- d'étudier spécifiquement l'évolution comparée d'indicateurs de sécheresse et leur lien avec la variabilité climatique (indicateur de la circulation atmosphérique ou océanique) : indices de sécheresse de nappe de type IPS (Indicateur Piézométrique Standardisé, récemment développé au BRGM), SGI (Standardized Groundwater Index), météorologique SPI (Standardized Precipitation Index), ou encore des sols SSWI (Standardized Soil Water Index) ;
- d'étudier, en fonction de scénarios d'évolution de la variabilité climatique (tels que des modifications de l'amplitude de la variabilité interannuelle, décennale, etc.), une possible modification de l'évolution temporelle des indicateurs de sécheresse utilisés, par simulation des réponses hydrologiques/piézométriques dans le bassin de la Seine à l'aide de la plateforme CaWaQS.

Cette action a pour objectifs : i) de caractériser l'évolution à long terme des extrêmes piézométriques et des indicateurs de sécheresses hydrologiques dans le bassin de la Seine par analyse et traitement des signaux hydro-climatiques, ii) d'analyser leur déterminisme climatique au travers de la caractérisation des liens avec les patrons de la circulation atmosphérique dans l'Atlantique nord, iii) d'étudier les modalités du filtrage de la variabilité climatique par les propriétés physiques des bassins et établir des scénarios de réponse aux extrêmes hydroclimatiques, spécifiquement les sécheresses.

Programme 2020 - 2021 :

Les deux premières années seront consacrées :

- à l'établissement de l'état de l'art sur la problématique des différents types de sécheresses, sur la place particulière des sécheresses hydrologiques/sécheresses de nappes et sur leur déterminisme, vue sous l'angle des contextes climatiques à grande échelle et contextes physiques locaux (hétérogénéité des propriétés physiques des bassins, impacts anthropiques et prélèvements) ;
- caractériser la manière dont les variations climatiques basse fréquence contrôlent l'apparition, la durée et l'intensité de ces extrêmes. Il s'agira ainsi de pousser l'analyse statistique proposée section 1.2.1, p.18, à l'étude des événements extrêmes. Nous attendons beaucoup de cette analyse, nous permettant éventuellement, au regard simplement du signal basse fréquence de débit ou piézométrique, de mettre en place des mesures de prévention qui pourront être mobilisées à l'échelle saisonnière en définissant des objectifs de gestion à moyen terme, objets de l'action 2.3.1, p. 38.
- à la collecte des données piézométriques sur le bassin de la Seine et à l'analyse de l'évolution des extrêmes piézométriques associés en termes de contenu spectral (quelles échelles caractéristiques de variabilité des hautes aux basses fréquences). Le même travail sera réalisé pour les différents types d'indicateurs de sécheresses (SPI, SSWI, IPS, SGI). Les



analyses porteront sur l'étude de leur variabilité multi-échelle temporelle en lien avec la variabilité climatique à l'échelle Nord-Atlantique.

Co-financement :

L'action est intégrée dans le cadre du projet GDI (Ground water Drought Initiative, coordination BGS et Université de Birmingham), des activités menées par certains membres des groupes Euro-FRIEND 2 et 3 (« Low-flow and Droughts » et « Large-Scale Variations in Hydrological Characteristics » du Programme Hydrologique International UNESCO. Elle devrait être renforcée par le travail d'une thèse BRGM / Université de Rouen-Normandie, portant sur les sécheresses hydrologiques et sécheresses de nappes à l'échelle de la France métropolitaine, sous réserve de l'acceptation finale de la thèse (co-financement BRGM validé).

BLOC 2.2. Une cascade d'effets induits sur les écosystèmes aquatiques

Le terme "d'effet induit" correspond ici à l'impact des réponses hydrodynamiques et ou thermique de la Seine lors d'événements climatiques extrêmes (ou sous climat changeant). Ces effets induits sont complexes, ils peuvent porter sur l'altération de processus biogéochimiques (terrestre comme aquatique), modifiant les flux parvenant au réseau hydrographique, leurs transferts le long du continuum aquatique ainsi que les échanges aux interfaces nappe-rivière. Ces effets induits concernent également le fonctionnement écologique de la Seine, avec des impacts sur la distribution spatiale des espèces piscicoles (présence, abondance, densité des espèces), l'évolution des habitats (zone de frayère, cycle de vie,..) et l'altération de la continuité écologique en Seine.

Assez peu d'études se sont intéressées à ces effets induits lors d'événements climatiques extrêmes, et ce second bloc s'appuiera fortement sur des développements d'outils et de modèles d'impacts permettant notamment de déconvoluer les effets induits par une modification des contraintes hydrologiques et thermiques.

2.2.1 Devenir du carbone lors d'événements extrêmes

Dans les bilans de Gaz à Effet de Serre (GES) à l'échelle globale, les eaux continentales, et plus particulièrement les réseaux hydrographiques à l'interface entre continents et océans, apparaissent aujourd'hui comme le lieu d'émissions de gaz à effet de serre d'intensité tout à fait significative. Ainsi les bilans régionaux, nationaux et globaux des flux de GES ne sont guère évalués.

Les teneurs en CO₂ des eaux de surface et souterraines de la Seine ont été quantifiées au cours de la phase 8 (Marescaux, 2018), et les investigations sur le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O) poursuivies. Toutefois, les crues de juin 2016 et de février et juin 2018, ont révélé des quantités de CO₂ (et de N₂O) importantes en lien avec des teneurs exceptionnellement élevées de matière organique. Dans un contexte d'événements climatiques extrêmes, ces fuites de matière organique et de GES vers les milieux aquatiques, puis vers l'atmosphère pourraient être amplifiées. Ces phénomènes pourraient même s'opposer au stockage de matière organique dans les sols, rendant caduque le concept des 4 p1000, quantité de carbone nécessaire à contrebalancer les émissions de GES. Toutefois, la matière organique issue des sols n'est soumise à des transformations significatives en GES que si elle comporte une fraction biodégradable importante. Or, trop peu de données existent sur la biodégradabilité de la matière organique dissoute et sa typologie (i) dans des

compartiments inter-reliés tels que les eaux sous-racinaires, souterraines et eaux de surface, (ii) dans un gradient lentique-lotique, (iii) au cours de cycles hydrologique et/ou saisonnier. La qualité de la matière organique lors d’une crue de printemps après le démarrage de l’activité biologique n’est de toute évidence pas la même qu’en plein hiver. Ces données de biodégradabilité sont par ailleurs fondamentales pour contraindre les simulations de GES dans les approches de modélisation (cf. BLOC 1.1, p.14, pour RIVERSTRAHLER et CaWaQS, BLOC 4.2, p.61, pour ProSe). Les aquifères carbonatés du bassin de la Seine apportent la majorité du CO₂ au réseau hydrographique (Marescaux, 2018) qui est ensuite dégazé. Ce fractionnement entre origine biotique et abiotique sera précisé par le développement du couplage entre CaWaQS et le module biogéochimique CHESS et permettra de mieux aborder la contribution des aquifères du bassin aux émissions de GES (cf. action 1.1.2, p.15).

Programme 2020 - 2021 :

Il s’agit d’appréhender la matière organique sous ses formes dissoutes et particulaires, ainsi que biodégradable, pour comprendre sa dynamique saisonnière et spatiale. Les gaz CO₂, N₂O et CH₄ seront également analysés.

Des prélèvements et analyses seront effectués à une fréquence mensuelle pendant 2 ans sur le bassin de l’Orgeval (en 2020 et 2021):

- dans les eaux sous-racinaires de parcelles agricoles sous différentes pratiques et cultures, jachères, forêts.
- dans les eaux souterraines des piézomètres de deux pentes du bassin
- dans les rus adjacents et mares

Ces mêmes informations sur la matière organique et sa biodégradabilité et les GES seront aussi recueillies sur les grands réservoirs du bassin de la Seine à une fréquence, de mensuelle à bimestrielle, ainsi que dans des zones stagnantes de la plaine de la Bassée (action 3.2.5, p.50) et dans l’agglomération parisienne (action 4.2.4, p. 65).

Des campagnes de prélèvements synchrones d’eau de surface en crue et en étiage à une vingtaine de stations pourraient être réalisées en complément des campagnes réalisées en phase 6, mais n’associant pas les GES.

Outre les analyses de gaz en chromatographie en phase gazeuse et par Infrarouge, de la matière organique dissoute et particulaire, la biodégradabilité sera calculée en mesurant la matière organique après une incubation de 45 jours. En parallèle, des mesures en spectrophotométrie 3D seront mesurées pour comparaison, et dans une perspective d’évolution du paramétrage du module biogéochimique RIVE .

Co-financement :

Cette action bénéficiera du soutien d’une étude exploratoire qui est en cours pour l’année 2019 dans le cadre d’un projet EC2CO SOLEAU centré sur l’Orgeval.

A cela s’ajoute, 84 % d’une bourse de thèse est acquise pour 42 mois pour une étude dédiée à l’impact des réservoirs sur les rivières aval, et sera impliqué dans cette action, outre une action modélisation.



2.2.2 Modélisation de la réactivité biogéochimique de l'interface nappe-rivière du bassin de l'Orgeval

L'objectif général de cette action est d'améliorer la compréhension du fonctionnement de la zone critique, par l'étude des données acquises pendant la phase 7 (nitrates, sulfates, phosphates) au niveau des interfaces nappe-rivière du bassin de l'Orgeval.

Dans un premier temps, cette action nécessite de compiler et de synthétiser toutes les données biogéochimiques acquises sur le bassin des Avenelles dont les mesures isotopiques, de radon, la base de données BDOH et les données du RiverLab.

Dans un second temps, l'outil de modélisation développé dans l'action 1.1.3, p.16, sera utilisé à l'échelle locale de l'interface des petits cours d'eau du bassin de l'Orgeval. Ceci permettra de valider les développements numériques et de conceptualiser un échantillonnage spécifique à la zone hyporhéique pour quantifier les processus majeurs à l'œuvre dans cette zone, à savoir la respiration bactérienne, les processus rédox et la dynamique de l'oxygène dissous (épisodes de désoxygénation).

Programme 2020 - 2021 :

En 2020 une synthèse sera réalisée sous forme de bilan des données acquises pendant la phase 7 sur le bassin de l'Orgeval incluant les éléments nutritifs (C, N, S, P), les mesures isotopiques, radon, base de données ORACLE et RiverLab. Cette synthèse fournira la base de réflexion pour conceptualiser un modèle réactif de l'interface nappe-rivière en 2021 sur le bassin de l'Orgeval.

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 du site de l'Orgeval.

2.2.3 Impacts indirects des extrêmes hydro-climatiques sur les peuplements de poissons

Cette action a pour but l'analyse de la continuité écologique piscicole de l'ensemble de l'axe Seine à l'actuel et dans le futur. Un premier volet consistera à poursuivre l'amélioration entreprise en phase 7 des modèles de distributions des espèces piscicoles qui permettent de prédire leur présence (et éventuellement leur abondance) dans l'ensemble du réseau hydrographique du bassin. Cette amélioration concernera la prise en compte, comme variable d'entrée des modèles, de la température de l'eau à la place de la température de l'air utilisée par défaut jusqu'à présent. Ce travail permettra ainsi de valoriser directement les résultats des travaux du BLOC 2.1, p.30, portant sur la modélisation des flux d'eau et de chaleur. En second lieu, l'amélioration des modèles passera par une meilleure intégration des paramètres de qualité d'eau et en particulier les concentrations en oxygène dissous et en ammonium connus pour pouvoir être critiques pour le développement des poissons. Une fois ces développements réalisés, des projections intégrant à la fois la modification des régimes thermiques et biogéochimiques des cours d'eau seront mises en œuvre pour déterminer leurs conséquences sur la distribution potentielle des espèces.

Un second volet consistera à modéliser les effets induits par une modification des conditions hydrologiques (intensité des crues, sévérité des étiages) ou des températures de l'eau sur la continuité écologique pour quelques espèces de poissons migrateurs ou résidents. Dans la continuité du projet Consacre (CPIER Vallée de la Seine 2018-2021), des secteurs comme l'Oise naviguée jusqu'à

sa confluence avec l'Aisne, ou/et la Seine en amont de Paris ou la Marne seront choisies comme secteurs d'étude en fonction de l'avancement de la modélisation hydrothermique et biogéochimique réalisée à l'aide du modèle ProSe sur ces secteurs. Les projections climatiques disponibles au sein de la Zone Atelier Seine pourraient permettre d'envisager des scénarios de continuité écologique future en lien avec l'anticipation de l'évolution de la qualité de l'eau (oxygène, ...) et la température.

Programme 2020 - 2021 :

Sous réserve de la disponibilité des données (sorties des modèles concernant la température et la qualité d'eau) les travaux portant sur les modèles de distribution à l'échelle du bassin pourraient démarrer en 2021.

Dans l'objectif d'évaluer les effets du réchauffement climatique sur la continuité écologique du bassin de l'Oise, une modélisation du secteur de l'Oise depuis la confluence Oise-Aisne, jusqu'à la confluence Oise-Seine serait développée pour compléter le modèle actuellement disponible. Il permettrait de simuler les champs de contraintes hydrauliques, biogéochimiques et thermiques permettant de quantifier l'accessibilité des habitats avec ANAQUALAND (Le Pichon et al., 2017) comme proposé dans le projet CONSACRE (2018-2021) pour le secteur de Seine depuis l'amont de Paris jusqu'à l'estuaire de la Seine. Le couplage avec ANAQUALAND serait envisagé à partir de 2022, sous réserve qu'un diagnostic des berges soit financé par ailleurs pour compléter celui réalisé en 2012 sur la région Ile de France (coût estimé à 150 000€).

Co-financements

L'étude de l'accessibilité à leur habitat par certaines espèces de poissons est prise intégralement en charge jusqu'à fin 2021 par le projet CPIER CONSACRE qui intègre le territoire des régions Île-de-France et Normandie.

BLOC 2.3. Conséquences en termes de gestion et d'exploitation de la ressource

Les développements numériques des axes 1 et 2 permettront d'évaluer les impacts directs et les effets induits par les extrêmes climatiques et plus généralement par le changement climatique. Cette chaîne de modèles dits « d'impact » servira de base pour étudier la résilience du socio-écosystème Seine en période de crise face aux événements extrêmes hydro-climatiques. Ces outils serviront également de socle à une réflexion prospective sur la gestion et l'exploitation de la ressource. Cette réflexion portera à la fois sur les aspects quantitatifs (usages, disponibilité, potentialité, renouvellement, recharges) mais également sur des aspects qualitatifs (fonctionnement biogéochimique des réservoirs et impacts sur les secteurs aval durant les étiages).

2.3.1 Gestion quantitative de la ressource en eaux

Le changement climatique augmente les tensions autour de la gestion quantitative de l'eau avec une diminution de la ressource disponible et une hausse de la demande en eau relative aux usages. Des stratégies nationales, régionales et locales de gestion intégrée des ressources en eau ont été mises en place depuis plusieurs décennies et font encore aujourd'hui l'objet d'une attention particulière pendant les périodes de crise définies comme des événements extrêmes ou lorsque les usages sont



plus importants que les taux de renouvellement. Cette action se focalise sur les usages de l'eau (irrigation, AEP), et sur la gestion quantitative de la ressource. Elle a pour but d'apporter des éléments de réponse sur l'évolution quantitative de l'hydrosystème pendant les périodes de crise et de tester des stratégies d'adaptation pour assurer une trajectoire soutenable de l'hydrosystème mise en contexte des scénarisations socio-climatiques élaborées par le programme. Deux échelles de temps seront considérées. L'une pour les trajectoires de long terme qui aideront à formaliser la stratégie d'adaptation du bassin en termes d'objectifs quantitatifs, et l'autre à court terme orienté vers la gestion de crises liées aux extrêmes. Les deux ne seront pas décorrélées puisque les tendances d'évolution du régime hydrologique de la Seine montrent clairement qu'il sera nécessaire au cours de cette période pluri-annuelle de favoriser la recharge des nappes en hiver pour permettre à l'ensemble des services écosystémiques fournis par ces dernières d'être pleinement opérant. Les travaux s'appuieront sur ceux des actions 1.2.1, p.18, 2.1.2, p.32, 2.1.3, p.33 qui se focaliseront sur la contextualisation des mesures par rapport aux oscillations basse fréquence du climat qui définissent des périodes contrastées de capacité du bassin à fournir certains services., et donc potentiellement à des périodes d'aléa accru au regard des risques envisagés.

La pérennité des usages de l'eau en lien avec la thermie sera également évaluée en milieu urbain en lien avec l'axe 4, notamment le potentiel thermique de l'utilisation de l'eau de la Seine comme réfrigérant pendant les périodes caniculaires et de sécheresse (action 4.3.1, p.67) et les remontées de nappe dans Paris et la petite couronne pendant les événements de fortes précipitations (action 4.5.1, p.69).

Les objectifs de cette action seront :

- une veille hydrologique et hydrogéologique : suivi de l'état des nappes et des échanges nappe-rivière pendant les événements extrêmes grâce aux monitorings mis en place durant les phases précédentes du PIREN Seine et à des estimations par modélisation ;
- l'estimation des échanges d'eau et de chaleur nappe-rivière et de la recharge des nappes pendant les événements extrêmes et principalement pendant les phases de sécheresses afin de proposer des prédictions de l'état de l'hydrosystème Seine pendant les périodes de crises;
- l'estimation de l'impact de l'évolution des usages sur l'hydrosystème Seine;
- une évaluation des impacts de la gestion des ressources (barrage-réservoir, irrigation) et définition de mesure de gestion vis-à-vis du contexte basse fréquence qui augmente ou diminue certains risques ;
- établir des objectifs de recharge de nappe en fonction des périodes climatiques, et proposer des voies d'atteinte de ces objectifs.

Programme 2020 - 2021 :

Au cours des années 2020 et 2021, il s'agira de maintenir le monitoring hydrogéologique et thermique des deux zones ateliers (Bassin des Avenelles et Zone de la Bassée) tout en garantissant le développement du modèle hydrologique couplé de référence du bassin de la Seine. Le modèle hydrologique/hydrogéologique couplé du bassin de la Seine sera mobilisé et développé pour estimer les échanges nappe-rivière sur le maximum de linéaire du réseau hydrographique pendant les événements extrêmes passés. A cet effet les nappes de la frange jurassique du bassin seront introduites dans le modèle Seine et une stratégie de modélisation développée afin de pouvoir simuler en parallèle l'ensemble du réseau hydrographique avec CaWaQS.

De plus, les évolutions spatiale et temporelle de la recharge des nappes seront définies et contextualisées en fonction des signaux climatiques basse fréquence. Les relations entre l'évolution

de la recharge et les échanges nappe-rivière seront analysées afin d’établir des préconisations pour la gestion du système à l’échelle saisonnière. La déclinaison de ces objectifs en mesure sera étudiée par le biais de tests numériques afin de décliner les objectifs de recharge en termes d’aménagements basés sur l’hydraulique douce (dé-imperméabilisation des sols, ralentissement des écoulements). Nous espérons grâce à ces travaux numériques être en mesure d’évaluer la compatibilité entre ces mesures et les objectifs de recharge des nappes.

Co-financement :

L’action bénéficie du soutien du projet AquiVar, financé par l’AESN, qui prendra en charge le développement de la frange jurassique et sa paramétrisation dans l’application du bassin de la Seine.

2.3.2 Les réservoirs, composants des continuums aquatiques: rétentions et émissions

Construits dans les années 50, avec pour mission de prévenir/réguler les débits en périodes de crues et en étiages, les quatre grands réservoirs du bassin de la Seine (Marne, Aube, Seine et Pannecière) ont également un impact sur le fonctionnement biogéochimique d’ensemble de l’hydrosystème Seine.

Les bilans entrée-sortie indiquent une rétention des nutriments dans les barrages, principalement pour les nitrates, le phosphate et la silice, mais aussi des MES, et un impact important sur le fonctionnement biogéochimique des écosystèmes aquatiques situés à l’aval.

A cela s’ajoute la quantification au sein de ces ouvrages des échanges (puits ou sources) de gaz à effet de serre (GES). Des premiers travaux portant sur le CO₂ (Marescaux, 2018) indiquent que faibles niveaux de CO₂ restitués par le réservoir de la Marne en été sont en mesure de contrôler la dynamique saisonnière du carbone inorganique dans les secteurs avals (jusqu’à Paris).

L’adaptation des règles de gestion de ces ouvrages, au-delà des enjeux hydrologiques (risques liés aux inondations, soutien d’étiages), devra nécessairement intégrer (i) la description du fonctionnement biogéochimique de volumes d’eaux retenus (incluant les échanges avec le benthos et l’atmosphère) et (ii) leurs impacts sur la qualité de l’eau à l’échelle du bassin versant. La simulation de nouvelle règle de gestion s’appuiera sur la plate-forme du PIREN Seine développée dans le BLOC 1.1, p14.

Pour pouvoir étudier des scénarios, le modèle BARMAN, basé sur RIVE et qui permet de simuler les milieux lenticques, sera intégré dans la chaîne de modélisation du PIREN Seine.

Programme 2020 - 2021 :

Les deux premières années seront consacrées à:

- des mesures directes complémentaires de gaz (CO₂, CH₄, N₂O) dans les 4 réservoirs pour différentes saisons (8 campagnes par an, analyses et missions prévues dans l’action 2.2.1, p35).
- le traitement et l’analyse des données acquises auprès de l’EPTB Seine grand lac pour ce qui concernent la gestion hydrique et les mesures physico-chimiques (carbone et nutriments) sur les années les plus récentes (chroniques à compléter depuis 2007)
- La production de lames d’eau naturalisées pour les besoins des simulations hydro-biogéochimique et l’évaluation des impacts dans un gradient amont-aval



- L'intégration des développements récents sur le CO₂ (CH₄ et N₂O), les échanges benthiques etc. au sein d'une version unifiée du modèle RIVE
- La co-construction de scénarios en lien avec EPTB Seine grands-lacs (adaptions des règles de gestion, prise en compte des extrêmes hydro-climatiques etc.)

Co-financement :

Ce projet s'appuiera sur un stage de Master 1 (en cours) sur la modélisation du fonctionnement biogéochimique des réservoirs avec focus sur les échanges benthiques Il devrait permettre (i) une mise à jours des données nécessaires au bilan hydrique et à la validation du modèle (ii) établir une version opérationnelle du code BARMAN.

De plus, un travail de thèse débuté en janvier 2019 (financé à hauteur de 84%) sur une durée de 42 mois sera en grande partie dédié à cette action. L'ensemble des travaux de terrain et de modélisation prévus dans le cadre de cette thèse seront notamment reversés à la présente action.

Des contacts sont pris avec l'EPTP pour acquérir des données sur la qualité des eaux dans les réservoirs de la Seine.



3. Axe 3. Construction de la qualité des milieux aquatiques conciliant risques hydrologiques et biodiversité (L. Lestel, N. Flipo)

Cet axe analyse la manière dont la qualité des milieux se construit avec l'évolution de la société et des usages dans les territoires (agricoles et industriels, protection contre les inondations, biodiversité, etc.) et comment différents groupes d'acteurs se l'approprient. Il allie une approche réflexive sur les outils et les connaissances construites dans le cadre du PIREN-Seine et une étude de la construction d'indicateurs de fonctionnement tant physico-chimique, qu'hydromorphologique, écologique ou paysager de deux types de terrains : les petits cours d'eau périurbains sur lesquels portent les opérations de restauration, et les grandes plaines alluviales aux enjeux multi-échelles dont notamment la plaine alluviale de la Bassée. Grâce à ces deux contextes hydromorphologiques, l'influence de la renaturation des lits majeurs sur la réduction des risques inondation sera également étudiée à différentes échelles.

Cet axe déclinera les approches suivantes :

- Socio-écologie des territoires par des enquêtes de terrain et des ateliers participatifs
- Évolution des fonctionnalités du territoire par une approche géohistorique
- Approches qualitatives et quantitatives des héritages par une analyse d'archives
- Quantification du fonctionnement du territoire par des campagnes de terrain et la déclinaison à l'échelle territoriale des modèles du PIREN Seine.

BLOC 3.1. Trajectoires des cours d'eau périurbains

Les trajectoires des cours d'eau périurbains à la périphérie des grandes métropoles sont contrôlées par de multiples facteurs que sont le fonctionnement biophysique altéré par les conséquences de l'étalement urbain, les héritages anthropiques multiples et les pratiques des sociétés riveraines dans la longue durée. Appréhender la situation contemporaine nécessite donc d'aborder ces rivières dans toutes leurs composantes. A cette fin, nous proposons d'articuler l'analyse des fonctionnements biophysiques avec les enjeux sociaux via les pratiques, d'hier à demain. A cet effet, un ensemble de cours d'eau (Beuvronne (77), Petit Rosne et Croult (93, 95), Mérantaise (78, 91), Morbras (94, 77)) représentatifs de la diversité régionale et de divers contextes sociaux, distribués dans l'ensemble de l'agglomération selon un gradient d'urbanisation, sera étudié. Nous nous intéresserons simultanément à leur fonctionnement biophysique sur le temps long et à l'évolution des paysages et des pratiques sociales.

3.1.1 Trajectoires biophysiques des petites rivières périurbaines d’Île de France, de leur aménagement à leur restauration

Le premier volet d'actions consistera à reconstituer les trajectoires fonctionnelles de petits systèmes fluviaux franciliens au cours des deux derniers millénaires qui correspondent à la période de leur transformation par l'anthropisation des bassins versants. Il s'agit de (1) caractériser les cours d'eau avant leur transformation par les sociétés urbaines et donc de contribuer à la réflexion sur les états et les fonctionnements de référence utilisables pour les gestionnaires dans la région ; (2) mesurer la part des héritages sédimentaires et écologiques dans le fonctionnement contemporain de ces hydrosystèmes et de leur devenir ; (3) positionner la situation contemporaine dans une trajectoire globale afin d'anticiper d'éventuels franchissements de points de basculement d'un point de vue hydrosédimentaire et écologique liés aux politiques de gestion et de restauration en cours, au développement de l'urbanisation, et au changement climatique ; (4) proposer les principes d'une classification typologique des cours d'eau et des tronçons franciliens qui prennent en compte la diversité des situations hydrosédimentaire et hydroécologique locales.

Programme 2020 - 2021 :

- Caractérisation des fonctionnements hydrologiques, hydrosédimentaires et écologiques contemporains (macro invertébrés, poissons, végétation rivulaire) par des approches de terrain et de laboratoire selon des méthodes déjà éprouvées pour l’analyse de tronçons représentatifs. Cette caractérisation sera étendue à l’ensemble du linéaire des cours d’eau cibles par l’utilisation de données terrain et LIDAR à très haute résolution afin de déterminer précisément l’organisation longitudinale et transversale de ces cours d’eau. Initiation de l’analyse basée sur des archives sédimentaires des cours d’eau cibles. Inventaire des archives disponibles à partir de recherches de terrain, de l’utilisation des images LIDAR, de la photo-interprétation et de l’inventaire exhaustif des travaux précédents.
- Mise en place de carottages et de prospections géophysiques permettant de caractériser l’évolution du style fluvial, et de la géométrie du lit et des habitats potentiels sur les tronçons identifiés comme riches en archives sédimentaires et représentatifs
- Début des analyses multi-indicateurs des sédiments échantillonnés : analyses sédimentaires et analyses paléobiologiques au LGP (Sédimentologie, CHN, Susceptibilité Magnétique, palynologie, Dendrologie, Microrestes Non Polliniques, signal incendie, diatomées) ou en prestation (analyses XRF, Datations radiocarbones, ...). Un effort spécifique sera entamé au cours des deux premières années pour tester l’ADNe ancien en collaboration avec les Universités de Southampton (UK) et de Tromsø (Nor.) qui permettront de définir l’évolution de la végétation, des habitats et de la faune.

Co-financement :

- Thèse de Lucille de Milleville « Trajectoire fonctionnelle (hydrogéomorphologie, biologie) des petites rivières périurbaines d’Île-de-France : l’exemple de la Biberonne, de la Mérentaise et du Morbras » (dir, L. Lespez, co-encadrement F. Gob et E. Talès), financement acquis (2018-2021), Université Paris Est-Créteil
- Projet ANR PARISTREAMs soumis



3.1.2 Penser et faire la restauration des petits cours d'eau métropolitains

Il s'agira également de caractériser les paysages des cours d'eau périurbains et les attentes des populations riveraines. Le groupe de travail conduira des investigations sous forme d'enquêtes auprès des habitants afin de renseigner leur relation à la rivière. Les rivières étudiées étant non domaniales, l'attention sera centrée sur les riverains et sur les populations locales souvent délaissées et pourtant potentiellement les plus concernées par l'amélioration de la biodiversité et de leur cadre de vie quotidien. Ce choix permet ainsi d'aborder des dimensions relatives à l'attachement paysager ou patrimonial, au foncier, ou encore à l'investissement potentiel des particuliers dans la gestion quotidienne de l'environnement. L'encouragement de la participation des riverains à la gestion de la rivière est identifié comme un levier pouvant favoriser une démarche plus ambitieuse vis-à-vis des rivières périurbaines. Pour cela, une réflexion sera conduite en partenariat avec les gestionnaires intervenant sur les rivières étudiées. Notre hypothèse est que les opérations de restauration écologique peuvent constituer une opportunité pour (re)connecter les habitants aux cours d'eau et leurs berges et les impliquer dans les choix de gestion. L'objectif de cette action sera de proposer des ateliers rassemblant les gestionnaires et les habitants pour dessiner ensemble le projet de restauration de leur rivière. Le terrain envisagé est la réouverture de la Vieille Mer en Seine Saint Denis.

Programme 2020 - 2021 :

Les ateliers auront lieu en 2023 et commenceront à être préparés en 2022.

Co-financement :

Stage de master 2 pour l'organisation de l'atelier financé par l'association ARCEAU-IDF (au titre du groupe de travail Rivières urbaines)

Projet d'ANR PARISTREAMs soumis

Possible soutien du CD93 pour l'organisation de l'atelier

BLOC 3.2. La Bassée, un projet de territoire à enjeux multi-échelles

Le territoire de la plaine alluviale de la Bassée est sujet à de multiples intérêts et à des usages différents : réserve d'eau souterraine, gisement de matériaux alluvionnaires, zone naturelle de grand intérêt écologique, zone récréative, voie navigable, production d'énergie, et implantation d'un casier pilote pour la protection de la Métropole du Grand Paris vis-à-vis des inondations. Cette vallée, connue pour ses richesses écologiques et ses ressources naturelles, est ainsi au centre d'enjeux politico- économiques et environnementaux importants. . À cela s'ajoute son potentiel rôle dans l'atténuation des crues menaçant l'agglomération parisienne en contexte de changement climatique, et par là- même, au-delà de la catastrophe humaine et sanitaire, l'économie nationale.

Nos multiples compétences disciplinaires, et notre pratique historique de l'interdisciplinarité, nous permettent de proposer un projet visant à construire une vision intégrée multi-échelle du fonctionnement socio-biogéochimique du territoire dans le temps long et à l'actuel permettant de construire un projet de territoire accepté localement et porté à l'échelle du bassin par les décideurs politiques. Nous proposons de mettre au cœur de cette réflexion la protection et la restauration de

la biodiversité afin de redire le risque inondation aval. Il s'agit ici de proposer un outil permettant de favoriser le dialogue territorial.

Le projet est découpé en sept actions qui permettront d'articuler des connaissances des chercheurs avec les actions publiques dans le territoire de la plaine alluviale. Cette articulation s'appuie sur trois groupes d'actions : 1) la caractérisation et la modélisation du fonctionnement hydro-géophysique du milieu dans le temps long, 2) son fonctionnement biogéochimique actuel focalisé sur les rivières et leurs annexes hydrauliques, les gravières, les zones humides et les eaux souterraines, 3) les trajectoires socio-écologiques de la Bassée, faisant le lien entre occupation des sols, végétation et fonctionnement hydrologique et thermique du lit majeur, des annexes hydrauliques, et des eaux souterraines. L'ensemble de ces d'actions s'appuiera sur des analyses d'archives, des campagnes de terrain multidisciplinaires, des déclinaisons territoriales des modèles phare du PIREN Seine, et des ateliers participatifs.

3.2.1 Construction des futurs souhaitables pour la plaine alluviale de la Bassée

La plaine alluviale de la Bassée est un milieu investi de longue date par les chercheurs du PIREN-Seine sur différentes thématiques, et un territoire faisant l'objet de plusieurs projets d'aménagement, d'envergure au moins régionale, posant la question de la réception de ces projets par les différents acteurs locaux et, plus largement, d'une exploration commune des futurs possibles de la plaine.

Du côté des chercheurs du PIREN-Seine, beaucoup d'études ont été engagées depuis les années 1970. La durée d'étude et de suivi permet d'une part, d'interroger ce qui en ressort (y compris des études en cours) et d'autre part de réfléchir collectivement aux apports de ces recherches sur la Bassée : leur utilisation, par qui, pour dire quoi ? En quoi les études faites sur le terrain apportent des informations localement ? Quelle intégration possible par les acteurs aux questions qu'ils se posent sur l'avenir de leur territoire ? et pour cela, comment formaliser les données, les résultats ?

Il s'agit de poursuivre le travail réflexif conduit par les chercheurs du PIREN-Seine dans la phase 6 et 7 sur l'utilité de la recherche à travers l'utilisation des connaissances scientifiques qu'ils produisent et leur articulation avec les connaissances des acteurs locaux qui font/vivent les territoires investigués. Ce n'est pas tant la question du transfert de connaissance (la connaissance scientifique en tant que telle ne dit rien de son utilisation, ni des conditions de son utilisation) dont il sera question dans cette action mais de participation des acteurs du territoire de la plaine de La Bassée et des gestionnaires du bassin à la construction d'une connaissance complexe pour l'action, articulant plusieurs types d'expertises et de connaissances.

L'objectif de cette action est ainsi de participer à ce travail prospectif avec une entrée stratégique – par la mise en place d'un collectif regroupant acteurs territoriaux, gestionnaires du bassin et chercheurs du PIREN Seine sur les futurs possibles de la Bassée et la production et l'utilisation de connaissances pour y contribuer - et une entrée pratique - avec un suivi participatif, autour de la mise à grand gabarit, de l'exploitation de gravières, de la protection des ZH, du casier pilote et de la liste des enjeux perçus ou probablement mis en avant par les acteurs à différentes échelles spatiales : risques inondation, biodiversité, services rendus par le territoire.

Programme 2020 - 2021 :

La première étape du travail consistera à mettre en place un collectif chercheurs-acteurs locaux-gestionnaires du bassin et de co-construire les questions de recherche et de gestion du territoire de la Bassée intégrant les solidarités aval-amont. Ces questions dialogueront étroitement avec



l'ensemble des actions du bloc portant sur la caractérisation bio-physique du fonctionnement de la plaine de la Bassée, et elles sous-tendront ainsi des suivis des risques ou des impacts des grands chantiers prévus sur la Bassée. On tentera à cet effet de mobiliser des outils de science participative.

Notamment, il est prévu d'alimenter des bases de données et d'utiliser un SIG comme outil de dialogue entre chercheurs et partenaires. Le SIG est compris à la fois comme un outil de capitalisation des données produites, de leur mise en commun, de réflexion sur leur utilisation, de productions cartographiques en appui des questions posées.

3.2.2 Chenaux abandonnés de la Bassée

Le but de cette action est de reconstruire des trajectoires sur le temps long d'anciens chenaux de la Seine abandonnés. Les objectifs sont de caractériser des hétérogénéités de l'architecture sédimentaire et les implications de ces hétérogénéités pour les écoulements hydrologiques sur plusieurs secteurs choisis. La dynamique de leur remplissage sera étudiée à différentes échelles de temps, i.e. du très long (10^{3-4} années) jusqu'au plus récent (en lien avec les aménagements du lit majeur depuis le début du XIXe siècle). Des informations complémentaires seront obtenues par reconstitution des paléotempératures lors du remplissage des chenaux à partir de la géochimie isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ et Δ_{47}) et organique (alkyl tétraéthers de glycérol) et par reconstitution des environnements végétaux à partir du contenu en pollen des séquences alluviales.

Un deuxième volet de cette action sera d'effectuer des modélisations probabilistes des hétérogénéités avec le logiciel Flumy de différents sous-ensembles du système puis d'effectuer une modélisation hydrogéologique avec le modèle CaWaQS dans le but d'intégrer le fonctionnement de ces objets spécifiques dans le fonctionnement hydro-géochimique global de la Bassée.

Programme 2020 - 2021 :

L'action démarrera en 2020 par la caractérisation des faciès sédimentaires de remplissage des chenaux (sites pilotes de Noyen et Vimpelles) : sondages à la tarière, échantillonnage de matière organique et coquilles de mollusque, analyses géochimiques, contenu en carbone et pollens. Ces faciès seront ensuite mis en perspective des occupations passées de la plaine grâce au dépouillement des archives, des cartes anciennes et de la documentation archéologique.

En 2021, la méthodologie appliquée en première année sera déployée sur deux nouveaux sites pilotes choisis en cohérence avec les actions portant sur la géochimie (action 3.2.5, p.50), la thermie (action 3.2.6, p.51), ou encore les indicateurs socio-écologiques (action 3.2.7, p.48) de la plaine alluviale. Ces campagnes aboutiront à un modèle de remplissage pour les chenaux de la plaine.

Co-financement :

Une thèse portant sur le « Remplissage sédimentaire des chenaux abandonnés » est financée par Mines ParisTech jusqu'en fin 2020. Un stage de master 1 de Paris 1 portera sur l'Évolution du pastoralisme, de la végétation et du climat en Bassée à partir des enregistrements polliniques. Un accord de consortium est en cours d'élaboration autour du logiciel FLUMY. Cet accord devrait permettre de soutenir une partie des actions relatives à la simulation des hétérogénéités de la plaine alluviale.

3.2.3 Modélisation hydrodynamique des interactions surface-souterrain dans la plaine alluviale de la Bassée

L'objectif de cette action est de Caractériser les écoulements au sein et entre les différents compartiments de la plaine alluviale de la Bassée : continuum rivière et ses annexes hydrauliques, aquifère régional.

Afin de représenter les écoulements dans le paysage complexe de la plaine alluviale de la Bassée l'effort de modélisation hydrodynamique sera poursuivi. En plus des interactions gravières-eaux souterraines (Jost et al., 2017), une modélisation des écoulements de surface débordants dans le lit majeur sera mise en place en relation avec les écoulements souterrains et les gravières.

Cette action permettra de caractériser les écoulements dans les différents compartiments de l'hydrosystème en vue d'estimer le transfert de contaminants dans la plaine et d'étudier la relation entre les écosystèmes de la Bassée et celui de l'hydrosystème.

Une modélisation hydrodynamique 2D sera mise en place avec le modèle DassFlow couplé au modèle CaWaQS intégrant la représentation des échanges surface-souterrain sur une zone à définir et d'emprise cohérente avec les coûts de modélisation et les données disponibles.

La modélisation s'appuiera sur le grand jeu de données disponibles acquis par le PIREN Seine, VNF et Seine Grands Lacs. Le réseau d'observation continuera à faire l'objet d'un effort important de suivi de la part des équipes du PIREN Seine. La géométrie du modèle sera construite en collaboration avec les géologues et géophysiciens du programme de recherche.

Programme 2020 - 2021 :

Le travail débutera par :

- Définition d'une zone d'étude d'emprise cohérente avec les objectifs, les données disponibles et les coûts de modélisation ; définition d'un scénario d'inondation pertinent
- Récupération de données (hydrométrie, topographie et bathymétrie du lit mineur fine - lidar au moins métrique en xy, décimétrique en Z, occupation des sols)
- Mise en place d'une modélisation hydrodynamique de surface 2D à fine échelle spatiale et événementielle (calage sur une crue représentative et validation)
- Affinage de l'emboîtement du modèle hydrogéologique souterrain en exploitant les données hydrogéologiques de la crue de janvier 2018
- Poursuite des bilans d'eau relatifs au fonctionnement des gravières en relation avec l'expertise locale pour la modélisation de ces dernières en relatifs avec l'évolution des pratiques d'exploitation au cours du temps

Et se poursuivra en 2021 :

- Mise en place d'une méthodologie de détermination des flux au sein et entre les compartiments de la plaine alluviale.
- Exploitation du modèle hydrodynamique 2D
- Analyse de sensibilité et préparation du couplage avec les écoulements souterrains et les gravières de la plaine

Co-financement :

Un projet de recherche qui visera à étendre les méthodologies de cette action à différentes échelles spatiales et temporelles sera soumis au programme TOSCA du CNES dans le cadre de la future



mission SWOT. L'accès au dispositif d'observation mis en place par VNF autour du projet de canal de navigation Nogent-Bray sur Seine est en cours de discussion, et notamment sur le transfert d'une partie des très nombreux capteurs aux équipes du PIREN Seine.

3.2.4 Fonctionnement biogéochimique des gravières de la plaine de la Bassée et leurs interactions avec la nappe

L'étude biogéochimique des gravières de la Plaine de la Bassée qui est proposée portera sur :

- leur bilan d'émission de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O), en relation avec leur fonctionnement biogéochimique et leur métabolisme
- Les conséquences du couplage gravière – nappe phréatique sur le cycle du C et de l'N
- L'évolution des gravières (comment elles vieillissent, dans leurs échanges avec la nappe et dans leur fonctionnement biogéochimique, eutrophisation)
- L'impact des crues de la Seine sur les cycles biogéochimiques (C N P) et résilience.

Au cours de la phase 7 du PIREN Seine, nous avons pu étudier des gravières présentant des fonctionnements physiques et biogéochimiques assez différents. La variabilité temporelle des flux de CO_2 , du CH_4 et du métabolisme s'avère être importante. Parmi les drivers identifiables, l'intensité et le sens des flux de circulation d'eau nappe-gravière pourraient être déterminants (Guillon et al., 2018).

Afin de pouvoir extrapoler aux autres gravières de la plaine de la Bassée (près de 400 plans d'eau), il est indispensable de préciser la représentativité des sites qui pourraient être étudiés. Ceci implique d'établir un recensement de ces gravières, basé sur une typologie combinant paramètres et fonctionnement hydrologiques, chimiques et biologiques.

D'un point de vue méthodologique, cette étude sera basée d'une part sur des campagnes ponctuelles synchrones réalisées sur un nombre significatif de gravières et à deux périodes clé du fonctionnement hydrologique et biogéochimique (été et hiver), et d'autre part sur un suivi continu (mesures à haute fréquence des paramètres biogéochimiques, hydrologiques et météorologiques) et en parallèle de deux gravières (le second site dépendra des possibilités de financement externes).

Des campagnes complémentaires dédiées à l'échantillonnage des nappes seront réalisées sur les piézomètres accessibles à proximité des gravières étudiées lors des campagnes synchrones et en relation étroite avec l'action 3.2.5 sur la géochimie de la plaine alluviale, p.50.

Par ailleurs, le modèle CAWAQS qui permet de quantifier les flux nappe-gravière (action 3.2.3, p.48) sera utilisé à titre prospectif pour aider au choix des gravières à suivre selon des critères de connectivité avec la nappe. Il sera également utilisé pour calculer les flux d'eau journaliers à l'interface nappe-gravière, analyser la cohérence du bilan hydrique avec les données de conductivité, de hauteur d'eau, de météo.

Les drivers du métabolisme carbone dans la dizaine de gravières échantillonnées sera déterminé en s'appuyant, d'une part, sur le modèle RIVE unifié qui intégrera alors les récents développements sur les gaz à effet de serre et sur la description de la matière organique, et d'autre part sur les données haute fréquence qui auront été acquises dans le cadre de cette action.

Programme 2020 - 2021 :

La première année sera consacrée à :

- Compilation des données existantes sur les gravières de la Bassée, les nappes (piézomètres).
- Utilisation du modèle CaWaQS pour déterminer le choix d’une dizaine de gravières en lien avec l’action 3.2.3
- Réalisation d’une campagne de prélèvements et de suivis instantanés sur ces 10 gravières représentatives. Ce type de campagne doit intervenir à l’une des deux périodes clés du fonctionnement biogéochimique et hydrologique, en hiver ou à la fin de l’été.
- Identification de deux gravières destinées au suivi HF et établissement d’une convention de travail pour la partie suivante de l’étude.

Et se poursuivra en seconde année par :

- Instrumentation pour le suivi en continu et à haute fréquence des paramètres clés du fonctionnement biogéochimique et hydrologique des deux gravières sélectionnées.
- Campagnes régulières de suivi (prélèvements, mesure des flux de GES).
- Réalisation de deux campagnes de suivis synchrones été-hiver sur environ 10 gravières.
- Démarrage de la modélisation des gravières avec RIVE, en relation avec l’utilisation du modèle Barman (action 2.3.2, p.40).

Co-financement :

Une bourse de thèse sera demandée à l’IPGP pour l’échantillonnage haute fréquence et la modélisation des gravières. Une demande à l’ANR sera également déposée afin, notamment, de compléter l’instrumentation HF du second site. L’action sera valorisée par la réserve naturelle de la Bassée dans le cadre de visites organisées sur le site de la gravière de la Cocharde.

3.2.5 Connectivité hydraulique et réactivité biogéochimique de la plaine alluviale de la Bassée

La plaine alluviale de la Bassée est un site étudié depuis longtemps dans le cadre du PIREN-Seine. Les premières approches par modélisation numérique de son fonctionnement hydrologique ont mis en avant une dynamique complexe d’échanges hydriques entre la rivière, sa nappe alluviale et l’aquifère régional de la craie (Labarthe and Flipo, 2016a). Lors de la phase VII du PIREN-Seine, deux campagnes multi-traceurs, incluant la mesure des paramètres biogéochimiques, ont été organisées en périodes de hautes et basses eaux et ont permis d’appréhender le fonctionnement hydro-biogéochimique de ce système par le biais de la connectivité surface-souterrain et de la réactivité de cette interface (Baratelli et al., 2017; Flipo et al., 2018; Parlanti et al., 2018). Ces travaux préliminaires ont ainsi donné des indications de mises en connexion possibles entre les trois compartiments (eaux de surface, craie et alluvions) et ont permis de proposer des hypothèses sur le fonctionnement hydro-biogéochimique du système.

Ces travaux ont montré tout l’intérêt de ces campagnes multi-traceurs pour comprendre la biogéochimie de ce site atelier et les processus aux interfaces nappes-rivière. Il apparait donc pertinent de poursuivre ces analyses et de les renforcer par la mesure de nouveaux paramètres et des campagnes de prélèvements à une fréquence d’échantillonnage plus importante. Pour la matière organique (MO), en plus du suivi de sa qualité, sa dégradabilité sera prise en compte dans les différents compartiments. Le suivi des gaz à effet de serre sera également entrepris. L’acquisition de ce grand jeu de données permettra de conceptualiser les processus et la réactivité à l’échelle de la plaine de la Bassée par le biais d’une modélisation couplée hydrodynamique-biogéochimique qui permettra de mieux appréhender le rôle joué par les grandes plaines alluviales dans le transfert de matières à l’échelle du bassin de la Seine.



Programme 2020 - 2021 :

Trois campagnes de prélèvements multi-traceurs seront réalisées par an. Les eaux souterraines et les eaux de surface seront prélevées au niveau des 12 stations MOLONARI qui ont fait l'objet des campagnes précédentes en y ajoutant, dans la mesure du possible, un nombre conséquent de piézomètres du réseau de suivi VNF.

Pour chacune des stations les échantillons d'eau seront prélevés dans chaque compartiment (craie, alluvions, rivière ou gravière). Au total une soixantaine d'échantillons d'eau seront donc prélevés par campagne afin de mesurer les différents paramètres biogéochimiques : conductivité, concentration en oxygène dissous, pH, température, rapports isotopiques $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$, concentration en carbone organique dissous et dissous biodégradable, gaz à effet de serre, nutriments, indices de qualité (absorbance et fluorescence 3D) de la matière organique dissoute, concentrations des ions majeurs.

En seconde partie de phase, quelques campagnes ponctuelles pourront être menées pour répondre à des questions particulières. L'essentiel du travail consistera à modéliser le fonctionnement géochimique de la plaine.

Co-financement :

L'accès au dispositif d'observation mis en place par VNF autour du projet de canal de navigation Nogent-Bray sur Seine est en cours de discussion, et notamment sur le transfert d'une partie des très nombreux capteurs aux équipes du PIREN Seine.

3.2.6 Fonctionnement thermique de la Bassée

Le fonctionnement thermique de la plaine alluviale de La Bassée est intrinsèquement lié au fonctionnement hydrodynamique, ce qui en fait un élément de contrainte physique essentiel pour l'analyse et l'évaluation des flux hydriques dans la plaine alluviale.

L'objectif de cette action est de déterminer le fonctionnement thermique de la zone de la Bassée à différentes échelles spatiales le long du corridor hydro-écologique de la Seine. Les mesures thermiques seront associées à quatre échelles distinctes :

- la mesure locale au sol à différentes profondeurs (< 1 m) à l'aide capteurs standards (type MOLONARI, ou prototype couplant aussi des mesures de résistivité électrique),
- la mesure des températures de surface sur une emprise hectométrique à l'aide de caméra embarquée sur drone (résolution de l'empreinte au sol inférieure au mètre),
- la mesure de température de surface sur une emprise kilométrique à l'aide de caméra embarquée sur avion (résolution de l'empreinte au sol de l'ordre de quelques mètres),
- la mesure de température de surface à l'échelle régionale à l'aide d'images satellitaires (ASTER,...).

L'inférence des flux hydriques à partir des données de température requiert une acquisition de données thermiques non seulement à différentes échelles spatiales, mais également avec un échantillonnage temporel adapté à la variabilité (journalière dans un premier temps) du battement de nappe au niveau du corridor hydrogéologique. Ces campagnes d'acquisition consisteront en plusieurs séries de mesures à pas de temps régulier permettant de décrire la variabilité significative des échanges nappe-rivière.

L'interprétation des données thermiques permettra de calibrer (voire d'inverser) un modèle thermique du sous-sol. Les flux thermiques étant liés au fonctionnement hydrodynamique, il sera

possible d'évaluer à l'échelle de la plaine alluviale les différentes contributions des flux hydrodynamiques associées aux phénomènes de conduction et/ou aux phénomènes de convection.

Ces mesures thermiques seront complétées par des campagnes de reconnaissances géophysiques sur des parcelles tests afin de permettre l'implantation optimale des capteurs de températures enterrés, mais aussi d'avoir une vue d'ensemble, à l'échelle de la parcelle, du niveau et du type d'hétérogénéités sédimentaires en proche surface (< quelques mètres de profondeur).

La zone d'étude concernera la partie aval de la Bassée jusqu'à la confluence de Seine, avec un focus sur la réserve de la Bassée. En effet celle-ci constitue la zone la plus équipée pour le suivi hydrogéologique tout en étant la zone la plus sensible vis-à-vis de la préservation de la biodiversité. Elle constitue par conséquent, une zone test idéale pour le développement méthodologique des techniques d'imagerie géophysique et d'interprétation de données thermiques pour la compréhension du fonctionnement hydrogéologique à la méso-échelle de la plaine alluviale de la Bassée. Le secteur de la réserve offrira de plus un site privilégié d'étude des relations entre la végétation et sa régulation hydrique et thermique par les eaux souterraines. Le secteur de la Bassée offrira de plus une déclinaison territoriale et un jeu de validation privilégié des développements portant sur la simulation des flux de chaleur dans le bassin de la Seine (action 2.1.1, p.30).

Programme 2020 - 2021 :

La première année de la phase sera consacrée à la mise en place et au test du protocole de mesures de températures croisées au sol et par survol. L'objectif consiste à mettre en œuvre sur une zone de quelques km² dans la réserve de la Bassée, le protocole de mesure par suivi temporel thermique sol/drone sur le continuum allant de la Seine jusqu'aux secteurs végétalisés de la plaine alluviale (minimum foliaire, maximum foliaire, basses eaux). En pratique, deux campagnes drone à haute résolution (acquisition de clichés dans les domaines thermique et visible 3D) seront réalisées sur une autre parcelle. Chaque campagne sera constituée de plusieurs vols afin de capter l'évolution temporelle diurne, grâce à une caméra thermique de haute définition (Jenoptik Variocam HD 880). La combinaison de l'imagerie thermique et visible 3D permettra de s'affranchir de l'influence thermique des paramètres physiques et optiques de la surface (notamment inertie thermique et albédo), ainsi que de l'effet de la topographie. La résolution thermique au sol de ces survols, réalisés à une altitude de 150m, sera de l'ordre de 8.5 cm et la résolution visible de 4 cm. Conjointement à ces campagnes, des capteurs thermiques seront implantés de façon pérenne dans le sol afin d'obtenir des séries continues de profils de températures, à comparer avec les données de température de surface obtenues par drone.

Six vols aéroportés (acquisition de clichés dans les domaines thermique et visible) seront ensuite réalisés et permettront d'observer le fonctionnement thermique du bassin à plus grande échelle avec une résolution thermique de 5 m : 3 périodes (minimum foliaire, maximum foliaire, basse eaux (saturation en eau dans le sol minimum)).

Dans un second temps, l'ensemble de ces données sera comparé à des données issues de l'imagerie satellitaire dans l'infra rouge thermique et le visible afin d'établir des lois de changement d'échelle et essayer de reconstituer des trajectoires thermiques de la plaine de la Bassée en se basant sur les archives d'images satellite.

Co-financement :

Une demande au programme du CNES TOSCA relatif à la future mission spatiale TRISHNA sera faite en 2019, afin de promouvoir notre approche de changement d'échelle et obtenir un soutien



logistique de l'UMS SAFIR pour les survols de la plaine de la Bassée avec un AZTEC-PIPER embarquant un panier de deux caméras IRT et multi-spectrale.

3.2.7 Trajectoires socio-écologiques de la Bassée depuis le XIX^e siècle

La Bassée est un territoire du bassin de la Seine avec une trajectoire singulière, souvent au service de Paris : d'abord réservoir de foin pour les chevaux de Paris et zone naturelle d'extension des crues, la transformation de la Seine pour en améliorer la navigation et donc l'approvisionnement de Paris, a changé son tracé et également modifié ses capacités de débordement. D'autres activités comme l'exploitation de gravières, ont profondément modifié ses paysages et les services rendus par ce territoire : modification des échanges nappes-rivières et donc impact potentiel sur la ressource en eau pour l'alimentation, difficile protection de la « dernière grande zone humide » du bassin de la Seine. Les projets actuels d'aménagement de la Seine dans la Bassée pour en accroître encore les capacités de navigation soulignent les échelles multiples de ce territoire dont les transformations ont un impact local mais dont les leviers sont *a minima* régionaux voire internationaux (protection de Paris contre le risque inondation, meilleure circulation des produits issus de l'agro-industrie).

Le but de cette action est d'identifier les différentes trajectoires socio-écologiques de ce territoire depuis le XIX^e siècle, d'en analyser la diversité et d'en comprendre les facteurs de contrôle afin de mieux anticiper quel pourra être l'avenir de ce territoire. Pour cela on mènera une réflexion sur les indicateurs de fonctionnement de ce territoire. Un effort de synthèse méthodologique sera mené afin de faire ressortir les indicateurs les plus pertinents pour le suivi à long terme des évolutions de l'hydrosystème face aux projets envisagés sur le territoire de la Bassée. Ces indicateurs seront testés tant pour déterminer leur « tolérance fonctionnelle » en lien avec le niveau de fonctionnement passé (approche géohistorique) et envisagé (décisions des acteurs du territoire) que pour en estimer des marges d'erreurs, notamment sous la forme de test de sensibilité.

Par rapport aux nombreux travaux déjà menés sur la Bassée au sein du PIREN Seine, cette action élargit son périmètre d'investigation à l'ensemble de la plaine alluviale, et sa grille d'analyse à l'ensemble des fonctions de ce territoire. Les résultats s'articuleront avec les attentes de l'action 3.2.1, p.46, de réflexion sur la construction de futurs souhaitables pour le territoire de la Bassée.

Programme 2020 - 2021 :

Le programme se décline en 5 points :

- analyse cartographique de l'évolution du territoire (occupation des sols, végétation, activités socio-économiques) et de l'évolution des paysages de la Bassée, analyse des Modes d'Occupation des Sols (MOS) 1982-2017
- recherches archivistiques sur les anciens bras de la Seine (en lien avec l'action « Chenaux abandonnés »)
- construction d'indicateurs en lien avec les deux points précédents
- historique des services rendus par la Bassée au travers des perceptions locales, régionales et nationales par l'exploitation d'archives, dans une démarche géohistorique
- analyse de l'impact des actions humaines dans la plaine alluviale depuis le XIX^e siècle sur l'évolution de sa biodiversité

Co-financement :

Recherche de co-financements pour saisir le MOS 1949



4. Axe 4. Ambitions et enjeux pour la Métropole en 2024⁺ (J-M. Mouchel, G. Varrault)

Le système d'assainissement de l'agglomération parisienne est de plus en plus performant et maîtrisé, des investissements majeurs ont été réalisés au cours de la dernière décennie, pour l'amélioration à la fois des capacités d'épuration et des capacités de gestion des réseaux (stockages, maillages). Cependant, la taille de l'agglomération parisienne et de son système d'assainissement face aux capacités de dilution limitées de la Seine exigent un niveau de performance toujours plus élevé et durable alors que de nouveaux enjeux se précisent. Cet axe de travail se concentre sur le fonctionnement actuel du fleuve sous influence urbaine, et sur les interactions entre le fleuve et la ville, sur l'acquisition et l'utilisation de nouvelles données pour de meilleures simulations de la qualité, notamment dans le domaine transitoire pour soutenir des politiques en cours de construction avec des échéances de l'ordre de la dizaine d'années.

Les travaux de cet axe mettront l'accent sur :

- La problématique de la baignade, reliant risque sanitaire et le fonctionnement du système d'assainissement, en intégrant une approche sociologique liée à la communication sur le risque et sa gouvernance.
- Le développement d'un outil adaptatif de gestion du système d'assainissement intégrant une évaluation des apports, modélisation biogéochimique de la rivière et mesures à haute fréquence
- La réactivité hydro-thermique et géochimique du fleuve et des aquifères, en relation avec l'aménagement de la métropole
- Le devenir des contaminants en étroite interaction avec l'axe 5.

BLOC 4.1. Enjeu baignade

L'enjeu baignade a toujours été présent depuis au moins deux siècles à Paris et en ses alentours (Haghe et al., 2017). Les récents engagements pris dans le contexte de l'organisation des jeux olympiques en 2024 donnent un élan nouveau aux efforts très importants qui doivent encore être menés pour que les épreuves de natation puissent se tenir en Seine. Au-delà de cette échéance, la pérennisation de lieux de baignade en rivière à Paris et dans ses environs constitue un enjeu encore plus fort.

Cette politique volontariste demande qu'un certain nombre de questions soient posées et de méthodes développées pour mieux appréhender le fonctionnement du système d'assainissement et

son impact au plan sanitaire en rivière, afin d'évaluer les progrès qui seront réalisés aux cours des prochaines années en comparant attentes et observations (grâce aux nombreuses campagnes de mesures actuellement réalisées et futures). La modélisation fait partie des instruments qui permettent ce suivi, tout en améliorant la connaissance. Nous proposons de renforcer la modélisation à l'aide de ProSe en évaluant plus en détails l'effet de certains facteurs tels que la variabilité des apports par les réseaux, l'hydraulique dans la Seine qui peut être très perturbée en temps de pluie, ou les propriétés physiologiques des bactéries indicatrices fécales, notamment dans les sédiments. Ces travaux passeront par un couplage de ProSe (Even et al., 2007, 1998; Flipo et al., 2004) avec les informations et résultats de simulation concernant le fonctionnement du réseau d'assainissement. Enfin, l'utilisation de différents traceurs des bactéries (tels que sérotypes ou antibiorésistance) devrait permettre de mieux cerner leur devenir dans la rivière.

L'autorisation de la baignade dans un milieu sous forte influence urbaine engendrera de profondes modifications dans la communication autour du fonctionnement du système d'assainissement et ses conséquences sur le milieu, car des informations devront être diffusées, comme actuellement sur les plages de bord de mer, autorisant journallement la baignade ou non. Une approche statistique sera menée pour élaborer les systèmes d'alerte, sans négliger pour autant le potentiel prédictif de ProSe. Il en résultera une situation complètement nouvelle qu'il est indispensable d'étudier au plan sociologique en termes d'attentes et de perception de l'enjeu baignade auprès de différents publics, y compris dans l'espace et le temps (autres époques, autres villes). Les informations apportées par les usagers, voire d'autres acteurs, devront être étudiées : quelles pourraient-elles être ? Avec quelles incertitudes associées ? Enfin, la circulation des informations elles-mêmes est un fait sociologique qui générera des réseaux formels et informels, et appellera à de nouvelles collaborations dans la cité, qui sans doute rejailliront sur l'ensemble du système d'assainissement d'une certaine manière.

Enfin, alors que la gestion de la baignade est fondée aujourd'hui sur l'utilisation de bactéries indicatrices fécales qui ne sont pas en général pathogènes elles-mêmes, il est indispensable, dans un souci de compréhension approfondie du risque, de continuer à développer les connaissances sur les pathogènes présents dans l'eau des rivières. Des connaissances existent sur des protozoaires, et sur plusieurs types de virus notamment grâce à l'action des producteurs d'eau potable. Les systèmes de surveillance doivent être maintenus, ils pourraient être étendus à d'autres pathogènes, au-delà de l'agglomération parisienne, voire au sein du bassin de la Seine. En particulier le cas des leptospires paraît particulièrement pertinent dans ce contexte car leur origine dans le bassin est mal connue alors que les occurrences ont augmenté au cours des dernières années.

4.1.1 Simulation des bactéries indicatrices fécales (BIF) en rivière

Cette action s'intègre dans le cadre du projet H2020 DWC (Digital Water City) porté par le SIAAP pour la partie française. Il s'agit de comparer plusieurs types de modèles de la rivière et des apports susceptibles d'être utilisés dans le cadre d'une gestion de la baignade en rivière dans la région parisienne. Les trois modèles a priori seront le modèle ProSe (mono-dimensionnel et pseudo bi-dimensionnel), le modèle SIM-Seine (en boîte), couplés à un modèle d'apport des BIF par les bassins versants urbains, et des modèles statistiques non localisés reliant les caractéristiques des hydrologiques et météorologiques aux teneurs attendues en BIF en différentes stations en rivière. Les modèles statistiques seront en particulier basés sur des travaux préalablement menés à Berlin (RWB, porteurs du projet DWC).

Le projet est basé sur plusieurs actions :

- une synthèse des données sur les caractéristiques des rejets (et des données terrain acquises par de plus en plus d'acteurs locaux)
- des campagnes de mesure à haute densité lors de périodes critiques dans des zones d'intérêt pour la baignade (cf. Fluidion et SIAAP)
- le développement d'une version de ProSe couplée avec les sources d'information relatives aux déversements (système MAGE, données en réseaux des départements), et son évaluation. Les développements logiciels nécessaires seront réalisés.
- l'ajustement et l'évaluation des modèles statistiques, y compris des modèles empiriques d'évaluation des rejets.
- l'analyse des incertitudes et de leur propagation selon différentes stratégies de modélisation

Programme 2020 - 2021 :

Les deux premières années du projet seront consacrées à la mise en place des chaînes de modélisation et à l'acquisition des données nécessaires (données hydrologiques, météorologiques, qualité sanitaire de l'eau...) auprès de différents services et opérateurs. En particulier les couplages entre les modèles ProSe et SIM-Seine et les modèles et/ou données disponibles pour l'estimation des apports (MAGE, autres modélisations hors de la zone centrale de l'agglomération) devront être rendus opérationnels. Les jeux de données de bactéries indicatrices fécales en cours de regroupement dans le cadre d'un groupe de travail piloté par la DRIEE et la ville de Paris permettront de consolider la paramétrisation des modèles et d'évaluer leur potentiel, par temps sec et par temps de pluie. Des modifications du code source de ProSe (dans sa nouvelle version ProSe-PA) sont envisagées, notamment pour mieux prendre en compte le devenir des BIF sans les sédiments. Des modèles statistiques non-localisés (relation directe entre données météorologiques, voire informations sur le réseau, et données de qualité en rivière) seront calés et évalués.

En fonction des premiers résultats obtenus, des campagnes complémentaires seront mise en œuvre, en concertation avec le groupe de travail précité. Elles seront focalisées sur des événements pluvieux. Une analyse de sensibilité, notamment en période pluvieuse, permettra d'identifier les principales sources d'incertitude et la manière dont elles interagissent.

Dans la phase 8, le cercle des développeurs de ProSe-PA, développé par Mines ParisTech, sera élargi à la DIE du SIAAP et à l'UMR Metis. Ce pôle prend la suite du groupe de travail ProSe qui a fonctionné au cours de la phase VI du PIREN Seine, et s'inscrit dans la dynamique de mutualisation des moyens entamée par l'action d'unification de RIVE (action 1.1.1, p.14). Pour que les développements partagés puissent être efficaces, les membres du pôle seront ainsi formés à l'architecture du code et aux règles de développement sous forme de bibliothèques fonctionnelles.

Co-financement :

Ce projet fait partie du projet européen H2020 DWC, et est complètement financé par celui-ci.

4.1.2 Mortalité des bactéries indicatrices de contamination fécale (BIF) dans les sédiments de rivière du bassin de la Seine

Les réflexions préalables à la construction de la phase 8 du programme PIREN-Seine ont notamment réaffirmé la volonté de renforcer la modélisation de la contamination microbiologique à l'aide du modèle ProSe en évaluant plus en détails l'effet de certains facteurs dont notamment les propriétés physiologiques des bactéries indicatrices fécales (BIF) dans les sédiments. Au cours des travaux de la

phase 6 du PIREN-Seine, un module décrivant la dynamique des *Escherichia coli* a été implémenté dans le modèle ProSe. Dans ce module, deux compartiments de *E. coli* sont pris en considération dans la colonne d'eau : les *E. coli* libres (non attachées aux MES) et les *E. coli* attachée aux particules qui sont susceptibles de sédimenter. Outre leur comportement différent vis à vis de la sédimentation, ces deux compartiments sont affectés d'un taux de mortalité différent et variable en fonction de la température. La mortalité des *E. coli* dans les sédiments et leur possible remise en suspension sont également prises en compte dans le modèle.

Il existe, par ailleurs, une volonté d'étendre le modèle ProSe à l'autre groupe de BIF repris dans la législation sur la qualité microbiologique des eaux de baignade: les entérocoques intestinaux (EI).

Il existe peu de déterminations de valeurs expérimentales de la mortalité des BIF (*E. coli* et EI) dans les sédiments ce qui entraîne une grande incertitude sur leur vitesse de disparition (en particulier dans les sédiments de rivières) et donc sur l'importance que peut avoir la resuspension de sédiments sur la qualité microbiologique de l'eau. La resuspension de sédiments en rivière peut survenir lors d'épisodes de crue, lors du passage de bateaux, ... L'action proposée ici vise à mieux appréhender les vitesses de mortalité des *E. coli* et EI dans les sédiments afin d'améliorer la modélisation de ce processus.

Programme 2020 - 2021 :

Cette action sera menée complètement au cours des deux premières années de la phase 8 du programme PIREN-Seine, soit en 2020 et 2021.

Des sédiments seront prélevés en Seine et en Marne principalement dans l'agglomération parisienne. Pour chaque échantillon de sédiments, plusieurs expériences « batch » seront réalisées à différentes températures (dans la gamme 5 à 20°C). Chaque expérience batch consiste en une incubation (de l'ordre d'une semaine) de sédiments surmontés par de l'eau collectée à la même station. Au cours de l'incubation, des sous-échantillons de sédiments seront collectés afin de dénombrer les *E. coli* et les entérocoques par comptage sur milieux gélosés spécifiques. Pour le dénombrement des BIF dans le sédiment, le protocole de décrochage des bactéries du sédiment proposé par (Ouattara et al., 2011) sera utilisé. Par ailleurs, un échantillon d'eau collectée à la même station que le sédiment sera incubé en batch sous agitation ; des sous-échantillons sont collectés au cours de l'incubation pour la détermination du taux de mortalité dans l'eau. Les dénombrements des *E. coli* et des entérocoques intestinaux se feront par culture sur milieu Chromocult coliform agar et Chromocult enterococci agar, respectivement.

Une quinzaine d'échantillons de sédiments seront traités comme expliqué ci-dessus au cours des années 2020 et 2021. Les sédiments collectés seront, par ailleurs, caractérisés par leur teneur en matière organique ; certaines études ont, en effet, montré que ce paramètre pouvait influencer significativement la survie des BIF dans les sédiments. Pour chacune des expériences, le taux de mortalité du premier ordre dans l'eau et les sédiments sera déterminé. Les résultats de ces expériences permettront de mieux connaître la gamme des valeurs de taux de disparition des BIF dans les sédiments à prendre en compte dans le modèle ProSe-PA.

4.1.3 Relation entre les Bactéries Indicatrices de contamination Fécale et les pathogènes hydriques

La directive 2006/7/CE a sécurisé la baignade en Europe. Sur la base d'un traitement statistiques de données épidémiologiques, il a été déterminé des valeurs seuils en bactéries fécales indicatrices



fécales (BIF) afin d'estimer la qualité microbiologique de l'eau (risque de présence de pathogènes fécaux). Aujourd'hui, les changements d'usage et de politique de l'eau, dans un contexte de changement climatique (événements pluvieux extrêmes..), auxquels s'ajoute l'émergence de pathogènes, peuvent générer de nouveaux risques pour la population. Ainsi l'organisation d'activités récréatives et sportives dans les rivières urbaines, nécessite de revisiter la pertinence de la directive.

Dans ce contexte, ce projet vise à évaluer la pertinence de la relation entre bactéries indicatrices de contamination fécale et agents pathogènes dans des zones de baignades potentielles. Le dénombrement des bactéries indicatrices de contamination fécale réglementaires (BIF) sera réalisé par culture selon la réglementation et s'appuiera également sur les données collectées à partir de systèmes de suivi in situ (Fluidion et/ou BACTcontrol). Sur les mêmes échantillons la recherche des principaux pathogènes hydriques sera menée :

- virus entériques : Norovirus GI et GII, Adénovirus, Rotavirus, entérovirus
- bactéries : *Escherichia coli* entéropathogènes et /ou résistante aux antibiotiques, Entérocoques ATbr, *Campylobacter jejuni*, *C. lari*, *Leptospira* spp. (souches pathogènes et concentration totale)
- parasites : *Cryptosporidium* spp. , *Giardia* spp.

L'origine des contaminations microbiennes sera confirmée par des approches « Microbial Source Tracking », notamment le phylogroupage des souches d'*E.coli*. En outre, les échantillons filtrés seront analysés en spectrofluorescence 3D, afin d'estimer la proportion d'eaux usées traitées dans l'échantillon et ainsi de mieux interpréter les résultats obtenus.

Cette étude complète notamment un ensemble d'actions menées pour caractériser les contaminations microbiologiques dans le bassin versant de la Seine. Ainsi sur l'Orge, un programme ANSES est en cours sur les *E. coli* entéropathogènes résistantes aux antibiotiques.

Dans le cadre du programme OPUR, les pathogènes présents dans les rejets et des eaux de ruissellement sur les surfaces urbaines seront analysés. De plus sur le bassin de la Villette, un couplage entre les stations d'alerte mesurant les BIF in situ (Fluidion ou BACTcontrol) et un modèle hydrodynamique 3D est en cours de développement en vue de compléter le système d'alerte mis en place pour la baignade de la Villette.

Programme 2020 - 2021 :

Les sites d'études envisagés sont 4 sites de baignades actuels et envisagés (Marne, Paris). Sur les deux années, 5 à 10 campagnes par site seront menées en période d'étiage et de hautes eaux , ainsi qu'après des événements pluvieux intenses.

Les données seront analysées statistiquement pour vérifier les variations spatiale et temporelle de la relation entre les concentrations en BIF et en pathogènes aux différents sites de baignade sélectionnés (modèle linéaire, modèles additifs), et la relation entre la présence des BIF et celle des pathogènes (modèle de régression logistique) en fonction des différentes conditions hydrologiques et météorologiques. Cette action sera menée complètement au cours des deux premières années de la phase 8 du programme PIREN-Seine, soit en 2020 et 2021.

Co-financement :

Pour réaliser cette étude, une demande de financement doctoral sera faite en 2019 auprès de l'École Doctorale SIE à l'Université Paris-Est.

Une demande de financement a été déposée en 2019 auprès de l'ANSES pour une étude sur l'impact des événements ponctuels (travaux sur le réseau d'assainissement, inondations, orages violents) sur la variabilité spatiale et temporelle de la qualité microbiologique des eaux de surface. La première étape d'évaluation a été passée avec succès.

4.1.4 Sociologie de l'enjeu baignade : attentes et perceptions des usagers et des acteurs de la gouvernance du risque vis-à-vis de la baignade

Une étude sociologique des perceptions et des pratiques de baignade en milieu urbain dans des contextes autorisés ou non est ici proposée. L'évolution des attentes des usagers (baigneurs, riverains non baigneurs) et acteurs des territoires sera analysée le cas du développement de zones autorisées à la baignade. Les usagers et acteurs ciblés sont ceux en charge de la gouvernance du risque sanitaire et les gestionnaires de l'eau.

Il s'agit d'évaluer à partir des sites de baignade, aménagés et spontanés, les perceptions de la qualité de l'eau et les attentes des usagers et la variété de leurs pratiques au regard des questions sanitaires et environnementales. Il s'agit également de rendre compte des représentations et des craintes des acteurs d'autres usages et des responsables de la gouvernance face aux nouvelles obligations de coordination et d'alerte. Il s'agit enfin de pouvoir entreprendre une comparaison avec la ville de Berlin où la pratique de la baignade dans les lacs urbains est historiquement très développée.

Cette focalisation sur la baignade sera ensuite mise en perspective avec des déterminants socio-politiques d'autres enjeux, notamment la navigation, qui est l'autre grande contrainte qui réduit les possibilités de baignade (en dehors des enjeux de qualité). Ce travail de mise en perspective sera conduit de 2022 à 2023 et s'articulera avec les scénarios d'évolution construits au sein du PIREN sur les évolutions des productions du bassin agricole (action 1.3.2, p.27) ainsi que sur les projets d'infrastructures de navigation (Canal Seine Nord, Canal Haute Seine).

Programme 2020 - 2021 :

Au cours de l'année 2020 nous envisageons (i) une enquête auprès du grand public sur les attentes et les perceptions, les controverses et les représentations (grâce à un stage de master 2) et (ii) une enquête auprès des gestionnaires de l'eau et des acteurs de la gouvernance de l'alerte sanitaire sur leurs attentes, craintes, perceptions et représentations (travail d'un post-doctorant).

En 2021, des focus group avec des usagers seront organisés pour collecter leurs attentes et réactions vis-à-vis d'un prototype d'application de gestion des alertes. Par ailleurs, une enquête similaire sera menée à Berlin, dans le cadre du projet DWC.

Co-financement :

Le projet européen H2020 DWC permettra de financer 12 mois de salaire d'un post-doctorant et les déplacements pour les enquêtes sur Paris, ce financement devra être complété dans le cadre du programme PIREN-Seine. Un projet de doctorat est envisagé durant la période et un financement sera recherché.



4.1.5 Présence des leptospires dans le bassin de la Seine

La leptospirose est une maladie encore mal connue, dont l'occurrence est due à des bactéries (leptospires) dont les rongeurs sont un vecteur majeur, mais non exclusif, d'autres animaux pouvant être porteurs. Elle se transmet à partir des urines, les bactéries ont une durée de vie importante dans l'eau, à la différence des BIF, et la transmission à l'homme se fait par contact (via des muqueuses ou de petites blessures). La leptospirose est une maladie majoritairement tropicale (Filleul et al., 2017) où les leptospires sont ubiquistes, mais son occurrence augmente en France au cours des dernières années et de nombreux cas liés à des pratiques récréatives ou sportives en eau douce ont été reportés en Europe au cours des dernières années (par exemple (Guillois Y Bourhy P, 2018)). Dans la plupart de ces études, le lien direct entre la population animale porteuse et la contamination humaine n'a pas pu être fait avec certitude.

La présence d'une forte population de rats dans l'agglomération parisienne est un facteur de risque important et une étude est en cours en région parisienne, menée par l'Institut Pasteur et Eau de Paris, pour évaluer la présence de ces bactéries dans les eaux naturelles et traitées.

A de nombreuses occasions, dans les pays tropicaux en particulier, l'occurrence de leptospirose a été reliée à des événements hydrologiques importants (Mohd Radi et al., 2018) avec éventuellement un enchaînement de causes liée à l'inondation (situation sanitaire générale dégradée), et une plus forte présence de ces bactéries dans des zones inondables a été suggérée.

Nous proposons donc d'étendre les travaux actuels menés en région parisienne par un travail exploratoire qui pourra être mené au cours de la deuxième période de la phase 8 du programme. Ce travail balaiera un ensemble de sites avec des contextes hydrologiques contrastés (potentiel d'érosion, présence de zones humides) qui pourront être échantillonnés en période d'étiage, en période de crue et si possible après de forts orages. La stratégie et les techniques d'échantillonnage tireront parti du projet en cours, on s'intéressera aux eaux, aux sédiments de berge et aux sols. L'association d'écologues au projet permettrait d'étendre son étendue à l'analyse de la contamination de la faune.

Programme 2020 - 2021 :

Démarrage de l'action prévu en seconde partie de phase en 2022.

Co-financement :

Des co-financements devront être recherchés au moment opportun (2021) auprès de l'ANSES et du CNRS (projets centrés « one health »).

BLOC 4.2. Enjeu carbone et nutriment dans les eaux de la Seine sous influence urbaine.

Les travaux de modélisation menés au cours des dernières années ont montré que les modèles développés jusqu'ici permettaient de rendre compte de l'évolution temporelle des flux faisant suite aux importants développements de l'épuration des dix dernières années. D'autres formes du carbone et des nutriments ont été introduites (notamment les gaz à effet de serre) et commencent à être simulées par les modèles pyNuts-RIVERSTRAHLER. Ces travaux mettent aussi en évidence que les périodes transitoires, telles que les périodes d'évolution et réglage des usines, sont moins bien

appréhendées. Elles feront ainsi l'objet de travaux spécifiques visant à développer un outil d'estimation des apports au fleuve basé sur des mesures ou sur des estimations du modèle de réseau d'assainissement.

Ces dernières années, les réseaux de mesure se sont densifiés et le mouvement va se poursuivre notamment avec des systèmes de mesure en continu par les stations du réseau MeSeine du SIAAP (3 stations de mesure en continu dans le secteur aval de l'agglomération parisienne) et les futures stations du réseau PHRESQUES (secteur Vernon-Poses et estuaire). Plusieurs actions sont de plus en cours pour accroître notre capacité d'observation en continu via de nouveaux systèmes de capteurs en développement industriels portant sur les nutriments et sur les indicateurs fécaux.

L'assimilation de données permet de relier les mesures de terrain aux paramètres des modèles. Cette technique a été implémentée dans ProSe-PA pour l'oxygène, et permet de concevoir des hypothèses sur l'évolution du fonctionnement de l'écosystème. Nous poursuivrons l'effort d'intégration des mesures dans ProSe-PA, pour d'autres paramètres de qualité (ammonium, nitrite, phosphate), dont les suivis à fréquence élevée seront bientôt disponibles et qui sont plus critiques aujourd'hui dans un contexte DCE. Cela permettra 1) d'analyser en termes de flux interne au fleuve l'ensemble des jeux de données historiques, et 2) de développer un outil de gestion opérationnelle des rejets en Seine en relation avec le programme MOCOPEE. Afin d'atteindre cet objectif, un groupe de co-développement des outils et de validation des développements sera mis en place au sein de l'axe.

Pour finir, un travail d'intégration de nouvelles données de caractérisation de la matière organique sera réalisé, via 1) le développement et le déploiement dans le milieu en relation avec le programme MOCOPEE de mesure en continu de la fluorescence 3D, 2) leur intégration dans le modèle RIVE via des classes de biodégradabilité. Des dispositifs de suivi en continu des gaz dissous (CO_2 en particulier) sont envisagés à terme dans la station de mesure en continu de Vernon-Poses, ce qui milite également pour l'intégration de la simulation des gaz à effet de serre dans la version de RIVE implémentée dans ProSe.

4.2.1 Mise en synergie des observations et des modèles par assimilation de données

Cette action s'inscrit dans la poursuite des travaux réalisés en phase VII portant sur l'assimilation des données d'oxygène dans le modèle ProSe, qui a mené à la création de l'outil ProSe-PA. Si ces travaux ont permis une avancée significative dans le couplage entre données haute fréquence et modèle, un certain nombre de développements sont nécessaires pour fiabiliser l'outil afin de 1) ré-analyser les données historiques d'oxygène mesuré depuis plus de vingt ans par le réseau MeSeine et 2) développer l'insertion de l'outil dans une chaîne de décision intégrée et temps réel réseau-assainissement-STEP-milieu récepteur.

Si la sensibilité du modèle RIVE a été étudiée précisément du point de vue des paramètres du modèles (S. Wang et al., 2018), le travail devra préciser la sensibilité du modèle couplé hydraulique-biogéochimie. À cet effet, une analyse de sensibilité aux intrants (rejets de STEP et déversements de temps de pluie) devra être maintenant menée afin de finaliser la procédure d'assimilation de données développée dans ProSe-PA. Le modèle pourra alors être intégré dans un prototype d'une chaîne de gestion intégrée du système réseau-assainissement-STEP-fleuve sur un secteur limité de la Seine, depuis Suresnes jusqu'à Andrésy ou Méricourt. L'outil permettra également de réanalyser l'ensemble des données d'oxygène disponible à l'échelle de l'ensemble du secteur historiquement décrit par ProSe. Pour développer ces deux approches, il conviendra également d'être à même de convertir des mesures caractérisant les rejets en Seine en variables d'entrée du modèle. Ces



conversions devront également prendre en compte les filières de traitement en STEP afin de pouvoir prendre en compte de potentielles périodes de chômage (action 4.2.2, p.63).

Les développements bénéficieront par ailleurs des développements concernant l'intégration de la description fine de la matière organique dans l'utilisation du modèle RIVE, ainsi que de la simulation du CO₂ dans les eaux de surface, permettant ainsi de fournir une représentation très fine des flux de carbone dans le système (BLOC 1.1., p.14).

Programme 2020 - 2021 :

Au cours de l'année 2020, nous prévoyons le développement de l'outil de mise en forme des intrants dans ProSe à partir des mesures dans les effluents de STEP ou des prédictions des modèles de STEP et de réseau d'assainissement. Cet outil devra intégrer l'état de la filière de traitement dans le temps pour intégrer de possibles périodes de chômage ou des modifications significatives technologiques. On procédera aussi à une étude de sensibilité de ProSe-PA vis-à-vis des intrants aux limites du secteur Suresnes-Andrézy.

Au cours de l'année 2021, les apports par les rejets seront intégrés dans le schéma d'assimilation de l'oxygène. Dans la suite de la phase, l'outil (modélisation et assimilation) sera utilisé pour une réanalyse des données d'oxygène. On développera ensuite un prototype intégré de gestion de la chaîne réseau d'assainissement – STEP – fleuve basé sur des données d'oxygène dissous.

La fin de phase envisagera d'exploiter les futures données haute fréquence du réseau PHRESQUES (action 4.2.3, p.64) afin de transférer la méthodologie d'assimilation des données d'oxygène vers l'étude du devenir des nutriments qui peuvent s'avérer déclassants pour le milieu, via par exemple la production de nitrites.

Co-financement :

Une bourse de thèse de MINES ParisTech, via l'ED GRNE, est fléchée sur la poursuite des travaux d'assimilation. La recherche de candidat pour la rentrée Universitaire 2019 est en cours.

Le SIAAP intégrera le pôle des développeurs de l'outil et prendra en charge le codage de l'outil permettant de caractériser les rejets. L'ensemble des données nécessaires au bon déroulement du projet sera également partagé.

4.2.2 Raffiner la caractérisation des sorties du réseau d'assainissement

Pour fonctionner, ProSe convertit les données caractérisant les sorties des usines d'épuration par une série de coefficients qui transforment les paramètres mesurés dans le cadre de l'auto surveillance (à fréquence journalière en général) en l'ensemble des variables nécessaires au fonctionnement de RIVE. Les paramètres mesurés permettent essentiellement de caractériser les flux de carbone, et de différentes formes de l'azote et du phosphore. La transformation de ces données en quantités de bactéries de différents types notamment résulte de l'exploitation de jeux de données de terrain acquises au cours des premières phases du PIREN Seine (Servais et al., 1999).

Cette situation provoque deux difficultés :

- d'une part les usines d'épuration ont considérablement évolué au cours de la dernière décennie (et elles continuent de le faire, ex : projet filtration membranaire à Seine-Aval). Pour le réalisme des simulations, il faut tenir compte de ces évolutions.

- la deuxième difficulté est qu'il faut être capable d'identifier des variations dans le traitement (en cas de pluie, en cas de travaux etc.). Les simulations réalisées au sein du groupe de travail ProSe montrent que c'est dans ces moments que les disparités simulations/observations divergent le plus (Vilmin, 2014). Cette problématique est particulièrement sensible pour ProSe qui fonctionne à fine échelle de temps.

L'action proposée consiste à revisiter dans un détail suffisant les caractéristiques des eaux traitées, il s'agit d'un travail essentiellement expérimental. A partir d'une bonne analyse du fonctionnement des usines, y compris dans des circonstances exceptionnelles, on doit être capable de définir des points d'échantillonnage en divers endroits au sein du procédé épuratoire pour simuler l'eau de sortie d'usine même dans des circonstances inhabituelles, qui seront à définir.

Outre les données acquises pour améliorer les simulations, ce travail permettra d'évaluer le potentiel ou l'importance de technologies épuratoires différentes, et des règles de gestion des usines. Un programme de mise en forme des rejets pour le logiciel ProSe synthétisera ces données et permettra de mieux scénariser les techniques d'assainissement et par là même de réduire les incertitudes sur les rejets. La réduction de ces incertitudes est cruciale pour développer des outils d'assimilation de données performants.

Programme 2020 - 2021 :

Une première étape (2020) consistera à identifier la sensibilité des différentes caractéristiques des effluents (en particulier les biomasses) sur la simulation des qualités de l'eau en Seine. Les plages à tester pour les différentes variables seront définies à partir des résultats antérieurs (Aissa-Grouz et al., 2018; Raimonet et al., 2015; Vilmin et al., 2015) et la connaissance acquises par la DIE/SIAAP. Par la suite, une réflexion sera menée sur (i) le choix des sorties d'ouvrage à explorer, et (ii) les méthodologies de suivi, notamment pour la biomasse et son activité réelle ou potentielle. L'année suivante (2021), les campagnes seront mises en œuvre, avec un soutien important de la DIE. A priori les analyses standardisées pour le suivi des effluents seront prises en charge par la SIAAP (en cohérence avec les pratiques d'auto-surveillance). Des analyses moins usuelles, pour l'évolution de la biomasse et de son activité, ou encore certaines caractéristiques de la matière organique dont sa stœchiométrie seraient prise en charge à Metis, et/ou au SIAAP si des inter-comparaisons de méthodes apparaissent nécessaires.

Un échelonnement des campagnes sur deux ans peut être envisagé. Un travail sera mené sur les cohérences à trouver entre la modélisation du fonctionnement des ouvrages d'épuration telle que mise en œuvre au SIAAP, et la définition des entrées nécessaires au modèle ProSe.

4.2.3 Synergie avec le réseau de mesure haute fréquence PHRESQUES

Le projet PHRESQUES consiste en la mise en place d'un réseau de systèmes de mesure en continu de la qualité de l'eau. Il fournira des données indispensables aux actions menées dans la cadre de ce bloc. Sans entrer dans les détails, les données issues du réseau concerne des paramètres aisément mesurables par des capteurs en continu (température, oxygène, conductivité, turbidité, chlorophylle estimée par fluorescence) au prix d'une maintenance soigneuse. Les données produites concernent aussi des mesures plus délicates pour lesquelles un travail de validation des capteurs eux-mêmes (mesure des nutriments, mesure du CO₂) ou un travail d'interprétation est nécessaire pour transformer la donnée brute validée en une autre information pertinente (estimation de la matière organique, de la biomasse algale ou des nitrates à partir de données optiques, estimation des MES à partir de données de turbidité rétrodiffusées ou de données ADCP -rétrodiffusées et distantes-).



Dans un premier temps, le projet complètera les données d'oxygène haute fréquence nécessaires au développement de l'action 4.2.1, p.62. L'assimilation des nutriments en particulier ne pourra intervenir qu'en toute fin de phase, alors que la montée en puissance de PHRESQUES pour ces paramètres prendra un peu de temps. Le phasage de PHRESQUES et du développement de l'assimilation est donc cohérent.

La station PHRESQUES qui intéresse particulièrement le PIREN-Seine est la future station qui sera implantée à l'amont de Poses. Les projets listés ci-dessus bénéficieront aussi beaucoup des données du réseau MeSeine mis en place par le SIAAP, et particulièrement des longues séries d'oxygène dissous. Les collaborations mises en place au sein du PIREN-Seine et du projet PHRESQUES permettront d'échanger aisément ces données et les résultats de recherche qui en résulteront.

Programme 2020 - 2021 :

Au cours des années 2019 et 2020, la station amont de Poses sera installée et testée pour ses différents capteurs dans la cadre du projet PHRESQUES. Par la suite (2021 et au-delà) la station sera entrée en mode opérationnel.

Co-financement :

Le projet PHRESQUES est financé dans le cadre du CPEIR vallée de Seine. L'OSU et la Zone-Atelier Seine apporteront des financements pour la maintenance à partir de 2021. A partir de 2021, la maintenance de la station implantée à l'amont de Poses par l'OSU Ecce Terra (Sorbonne Université et co-porteurs) et la Zone-atelier Seine est prévue. L'université a prévu un ingénieur à temps partiel à cet effet, l'OSU et la Zone-Atelier Seine pourront contribuer aux remplacements nécessaires.

4.2.4 Dégradabilité de la MO dans les milieux récepteurs aquatiques sous forte pression urbaine par spectrofluorométrie haute fréquence.

Cette action comprend deux volets. D'une part, elle s'inscrit dans l'action dégradabilité de la MO présentée plus en détail dans les actions 2.2.1, p.35, et 3.2.5, p.50. Il s'agira de caractériser la dégradabilité de la MO contenue dans les effluents des cinq STEP du SIAAP, dans les RUTP (un déversoir) et dans l'axe Seine à l'aval de Paris (Suresnes-Bougival-Triel). D'autre part, il s'agira de caractériser grâce à la spectrofluorométrie à haute fréquence (jusqu'à 5 mesures par heure) la MOD en Seine à la traversée de l'agglomération parisienne. La mesure HF nous permettra de prendre en compte les périodes transitoires, telles que les périodes d'évolution et de réglage des usines ou bien les rejets urbains de temps de pluie, qui sont à l'heure actuelle moins bien appréhendés.

Afin d'optimiser les filières de traitement et pour mieux comprendre la réponse du milieu récepteur aux flux déversés par l'agglomération, il est également important de prendre en compte les variabilités saisonnières de la MOD dont il a déjà été démontré dans les phases précédentes du PIREN et dans la littérature que la nature (et donc la dégradabilité) variait considérablement selon le cycle hydrologique.

Le déploiement de la mesure par spectrofluorométrie haute fréquence sera réalisé en étroite collaboration avec le SIAAP dans le cadre du volet Innovation du réseau MeSeine. Le post-doc d'Angélique Goffin a permis d'établir le schéma optique d'une sonde de fluorescence et les types de sources et de détecteurs. Le prototype est en cours de construction avec l'aide d'un bureau d'étude spécialisé en optoélectronique. Les premiers essais devraient commencer à l'été et se poursuivre à l'automne 2019.

La dégradation de la MO contenue dans différentes sources va être suivie en spectrofluorométrie 3D lors d’expériences d’incubation de façon à développer des indicateurs de la dégradabilité de la MO provenant de sources les plus importantes dans les milieux récepteurs aquatiques sous forte pression urbaine. Dans un second temps, les deux dernières années, l’influence de la photodégradation sur la dégradabilité sera également prise en considération.

Les différentes sources de MO caractérisées en prenant en compte la variabilité spatio-temporelle seront :

- eaux de surface aval agglomération parisienne (Suresnes-Bougival-Triel)
- eaux usées traitées des cinq STEP du SIAAP
- eaux usées contenus dans les RUTP d’un déversoir d’orage

Il s’agira finalement, avec les modélisateurs, d’intégrer ces indicateurs de dégradabilité de la MO issus de la spectrofluorescence 3D dans le modèle RIVE via des classes de dégradabilité. L’intérêt de ces potentiels indicateurs est d’être accessible à court-terme avec des capteurs permettant la mesure haute fréquence en ligne des quantités de MO dégradable.

Programme 2020 - 2021 :

Les années 2020 et 2021 seront des années de déploiement et de tests des sondes sur les sites de mesure en continu du réseau MeSeine, pour atteindre un fonctionnement optimisé en 2022 et 2023. Il s’agira donc de travailler sur les problématiques courantes lors de ce type de déploiement : fouling (même si un dispositif antifouling est prévu) de la sonde de mesure, effet des MES et des variations de température sur la qualité des mesures (quelles méthodes de correction du signal utiliser parmi celles qui existent à l’heure actuelle), traitement des données obtenues en HF, dérive et correction du signal, qualification de la fiabilité des mesures réalisées. Les mesures hebdomadaires (MeSeine) réalisées par le SIAAP et le LEESU en laboratoire seront utilisées pour qualifier la qualité des mesures réalisées avec la sonde de fluorescence.

En parallèle, des campagnes bimensuelles seront menées dans l’axe Seine (Suresnes-Bougival-Triel) avec notamment des mesures de COD et de fluo 3D. Pour six campagnes par an (campagnes bimestrielles) des mesures de CODB seront effectuées en plus avec un suivi cinétique (8 points) systématique de la fluo 3D et du COD pendant la biodégradation. La STEP Seine-Aval sera particulièrement suivie avec des campagnes bimensuelles (COD et fluo 3D) et des campagnes bimestrielles (CODB et suivi cinétique systématique de la fluo 3D et du COD). Pour les 4 autres STEP du SIAAP, 2 campagnes/an seront menées (COD, fluo3D, CODB avec suivi cinétique du COD et de la fluo 3D) en relation avec l’action 4.2.2, p.63. Pour le RUTP, 2 campagnes/an seront menées (COD, fluo3D, CODB avec suivi cinétique du COD et de la fluo 3D).

Co-financement :

Le SIAAP prend en charge le développement de la sonde de spectrofluorométrie (contribution d’un post-doc et financement du bureau d’étude spécialisé en opto-électronique). Il assurera également la logistique sur site et les prélèvements manuels comparatifs ainsi que la mesure des paramètres globaux sur les échantillons.

Une demande de financement de thèse sera faite en 2020 auprès de l’École Doctorale SIE.



BLOC 4.3. Thermie de la Seine à la traversée de Paris et de la petite couronne

Ce bloc ne comporte qu'une action. Il est complémentaire au niveau de l'axe métropole de l'action 2.1.1, p.30, menée à l'échelle du bassin de la Seine, et qui permet de donner les contraintes aux frontières de l'agglomération parisienne.

4.3.1 Thermie de la Seine à la traversée de Paris et de la petite couronne

Le secteur de l'énergie utilise les eaux superficielles comme réserve d'énergie thermique renouvelable, pour chauffer ou refroidir les infrastructures proches. Dans cette action, des développements numériques seront réalisés afin d'estimer les potentiels thermiques de la Seine à la traversée de l'agglomération parisienne.

Le logiciel ProSe-PA sera ainsi adapté afin de simuler le transport de l'énergie sur la base d'une formulation permettant de gérer simultanément les transports d'éléments dissous et d'énergie via la librairie de calcul libttc développée par Mines ParisTech. Afin d'estimer les mélanges d'eau latéraux, ProSe-PA réintègrera l'approche par tubes de courant qui permet de simuler un transport en 2D. Finalement un module calculant le bilan d'énergie à l'interface eau-air sera développé. L'ensemble de ces développements est soutenu par le projet CPIER CONSACRE, dédié à l'étude de la continuité écologique du point de vue de certaines espèces de poissons.

Afin d'aboutir à une vision intégrée des flux d'énergie dans l'agglomération, l'influence des eaux souterraines sur la thermie de la rivière sera également étudiée. Il s'agira de connecter la modélisation des écoulements souterrains et de surface via le couplage entre les modèles CaWaQS et ProSe-PA 2D. Afin de calibrer ce modèle qui s'appuiera sur deux modèles développés indépendamment, une base de données des potentiels thermiques du sous-sol (températures des aquifères, des berges, des eaux usées) sera constituée. La calibration du modèle hydrogéologique de Paris et sa petite couronne, développé dans le cadre de la thèse CIFRE de Mathias Maillot portée par l'EPTB Seine Grands Lacs, sera affinée grâce à cette base de données en utilisant la température comme traceur des écoulements. Il sera alors possible d'estimer les échanges d'énergie entre la Seine et l'aquifère alluvial sous-jacent.

Les impacts des scénarios climatiques seront alors évalués. En fin de phase, cette action s'orientera vers la caractérisation de l'îlot de chaleur urbain et de ses impacts. Une attention particulière sera portée sur les étiages afin de mesurer les impacts des différents usages (prélèvements et rejets) sur l'évolution de la température des eaux de la Seine.

Programme 2020 - 2021 :

La première année sera consacrée au développement de ProSe PA en pseudo 2D pour obtenir une spatialisation transversale de la température de la Seine. La base de données des températures du sous-sol et de la Seine sera également constituée afin d'améliorer la calibration du modèle hydrogéologique de Paris.

L'année 2021 sera dédiée à la mise place du couplage de CaWaQS avec ProSe-PA pseudo2D. La base de données thermiques permettra de paramétrer l'interface nappe-rivière par ses propriétés de conduction de la chaleur, ainsi que la valeur du coefficient de conductance (transport par l'eau qui s'écoule). Il sera alors possible, en lien avec la modélisation des flux de chaleur à l'échelle du bassin

de la Seine (action 2.1.1, p.30) de dresser un premier bilan énergétique du fleuve à la traversée de l'agglomération.

Co-financement :

Le développement du transport de chaleur dans la rivière est financé par le Projet CPIER CONSACRE dont un des sous-objectifs est l'évaluation des discontinuités thermiques sur l'accessibilité des habitats pour certaines espèces de poissons.

BLOC 4.4. Micropolluants

Les micro-contaminants font l'objet des travaux de l'axe 5, mais la Seine dans sa partie soumise à l'influence urbaine est un des sites les plus influencés par ces contaminants. En particulier, dans la ligne des évolutions proposées pour ProSe, le développement d'un module micro-polluants générique est envisagé dans RIVE. Les campagnes qui seront menées dans l'axe Seine pourront être utilisées pour le valider suivant une approche pionnière développée par le passé pour les alkylphénols (Cladière et al., 2014b, 2014a) via un transport par « famille d'espèces » (Vilmin et al., 2012). Sous réserve que les entrées du système soient bien évaluées, les résultats de la modélisation aideront à connaître l'évolution spatiale et temporelle des familles de contaminants et donc l'exposition du biote.

L'existence d'un axe spécifique consacré aux micropolluants dans l'axe métropole facilitera la communication sur ce sujet important avec les acteurs de la métropole, et l'efficacité des connexions avec le programme OPUR.

4.4.1 Modélisation du transfert des micropolluants dans l'axe Seine

La version d'un module destiné au transfert des contaminants dans ProSe prend en compte la dégradation des précurseurs immédiats de ces molécules, et leur vitesse de dégradation. La modélisation des micro-polluants reste un enjeu d'importance même si de fortes imprécisions sur les données d'entrées sont encore une limitation. Elle reste un outil exploratoire intéressant. Le développement d'un code générique, à intégrer au module RIVE, facilitera le développement de l'utilisation de la modélisation dans des travaux consacrés aux micropolluants, et permettra de fait de progresser en structurant les connaissances.

Les processus à inclure dans ce code doivent pouvoir simuler (i) des voies de production et de dégradation des contaminants, (ii) les échanges solide-liquide, prenant en compte la spécificité des sédiments (iii) les interactions des contaminants avec la matière organique. De nombreux travaux ont été menés par le passé par les équipes intervenant dans le programme, ce qui permettra de proposer des formulations génériques des processus globalement ou par grands groupes de contaminants. Par ailleurs, la littérature scientifique n'est pas avare de propositions pour simuler ces processus.

Programme 2020 - 2021 :

Le travail sera réalisé dans le cadre du pôle de modélisation ProSe-PA et du développement de RIVE unifié. Il s'échelonnera au cours des 4 années de la phase 8, avec une première année consacrée à la



synthèse des formulations possibles pour simuler les principales voies de transport et transformation des micropolluants.

BLOC 4.5. Hydrogéologie de l'agglomération parisienne

Aujourd'hui notre compréhension du fonctionnement hydrogéologique du sous-sol parisien repose sur des observations piézométriques réalisées par l'Inspection Générale des Carrières. Un premier modèle hydrogéologique a été réalisé par Aurélie Lamé mais ce dernier ne propose pas de vision dynamique du système (Lamé, 2013). Un modèle hydrogéologique dynamique de Paris et de sa petite couronne est en cours de développement dans le cadre de la thèse de Mathias Maillot portée par l'EPTB Seine Grands Lacs. Une première calibration en sera disponible fin 2019. Ce modèle servira ainsi de base aux travaux sur l'hydrogéologie de l'agglomération parisienne de la phase 8 du PIREN Seine.

Ainsi, en lien avec les scénarios climatiques construits à l'échelle du bassin de la Seine, le modèle sera mobilisé pour anticiper les risques de remontées de nappe au sein de l'agglomération parisienne. Une déclinaison territoriale des flux de chaleur sera également construite afin d'évaluer l'effet des pratiques anthropiques sur la température des eaux souterraines, et par conséquent de leur contribution ou non au régime thermique du fleuve (action 4.3.1, p.67). Pour finir, couplé à au modèle géochimique CHESS (van der Lee et al., 2003), il servira à fournir une première évaluation du potentiel de ré-infiltration vers les nappes des eaux pluviales par une réduction de l'imperméabilisation de la surface, et son impact quantitatif et qualitatif sur les eaux souterraines. Ces mesures seront également mises en regard du risque de dissolution des gypses du sous-sol de l'agglomération dans certains secteurs critiques.

4.5.1 Risques liés aux remontées de nappe

L'agglomération Parisienne a connu de nombreuses inondations liées à des crues de la Seine. Les événements extrêmes de précipitation peuvent provoquer des inondations par débordement, mais également, du fait des interactions rivière-nappe, des phénomènes de remontée de nappe. Cette action a pour but d'estimer la vulnérabilité de la zone du Grand Paris aux risques inondations liés à de fortes pluies en intensité ou en durée. L'extension des zones touchées par les inondations peuvent être très variables en fonction de la localisation de l'événement pluvieux mais également en fonction de la réactivité de la Seine et des aquifères sous-jacents. Cette action a pour objectif de définir la vulnérabilité de l'activité économique, des transports souterrains, du bâti, de l'environnement et du patrimoine culturel aux risques inondations, dans la continuité des actions PAPI Seine et Marne Franciliennes (Programme d'actions de prévention des inondations). Dans ce cadre, il s'agira de fédérer les différents réseaux de suivi de la pression et de la température des eaux souterraines et de surface de l'agglomération afin, à terme, de pouvoir proposer un système d'évaluation en temps réel de la vulnérabilité du sous-sol à de potentielles remontées de nappe. Ce système s'appuiera sur les développements méthodologiques réalisés récemment : méthodologie de cartographie piézométrique intégrant une estimation de l'état de connexion nappe-rivière, développement du modèle hydrogéologique de Paris et de sa petite couronne.

Programme 2020 - 2021 :

Sur la base du modèle élaboré sur Paris et sa petite couronne, un nouveau modèle intégrant une définition plus précise des formations sera développé, grâce aux données géologiques acquises par la Société du Grand Paris, dans le but d'améliorer la représentation des flux entre les différents faciès du sous-sol parisien. Ce modèle sera développé grâce à la méthodologie des modèles emboîtés, mise en œuvre en phase VII pour simuler le fonctionnement de la plaine alluviale de la Bassée (Labarthe and Flipo, 2016b), afin de contraindre les flux aux limites du modèle de Paris et sa petite couronne. Le couplage CAWAQS – PROSE-PA 2D (action 4.3.1, p.67) sera également mobilisé afin de reproduire le fonctionnement de la Seine dans Paris et d'obtenir une meilleure représentation des échanges nappes-rivière en période critique de crue. Les scénarios de propagation souterraine des événements de crue élaborés par Mathias Maillot seront de plus raffinés afin de mieux définir la vulnérabilité du bâti et des infrastructures à différents types de crues.

Co-financement :

La réalisation d'un doctorat serait tout à fait cohérente avec ce projet. Des financements spécifiques seront recherchés pour son financement.

4.5.2 Évaluation de l'impact de la réinfiltration des eaux pluviales

La stratégie d'adaptation au changement climatique adoptée sur le bassin de la Seine préconise de favoriser la dés-imperméabilisation des tissus urbains afin de favoriser la ré-infiltration des eaux pluviales. Or les eaux de pluie qui s'infiltrent dans le sous-sol modifient les équilibres géochimiques de ce dernier pouvant engendrer la dissolution du substratum, et par là même des risques d'effondrement du sous-sol, notamment dans les anciennes carrières souterraines de la capitale.

Il s'agira ainsi d'évaluer les risques que la ré-infiltration des eaux pluviales pourrait faire peser sur le sous-sol parisien. Ce travail s'appuiera tout d'abord sur la modélisation hydrogéologique proposée précédemment, afin d'évaluer les modifications qu'engendrerait la ré-infiltration des eaux pluviales sur les écoulements souterrains et son effet sur les volumes d'eau pompés dans le sous-sol parisien pour préserver les infrastructures souterraines. La scénarisation des volumes ré-infiltrés suivant le règlement de pluie sera élaborée en collaboration avec les services de la Ville de Paris et en relation avec le programme OPUR. Dans un second temps ce modèle sera couplé au code géochimique CHESS afin d'évaluer l'influence de la ré-infiltration des eaux de pluie sur la géochimie des eaux souterraines, et les effets potentiels sur le phénomène de dissolution des gypses. Ce modèle s'appuiera sur le suivi de sites pilotes réalisés par l'IGC qui sera un partenaire clé de ce projet.

Programme 2020 - 2021 :

L'action démarrera par la constitution d'une base de données géochimiques afin de caractériser les signatures géochimiques de chaque faciès composant le sous-sol parisien. Les écarts par rapport aux équilibres géochimiques seront susceptibles de nous renseigner sur les circulations d'eau dans le sous-sol. Cette base recensera l'ensemble des données directement obtenues dans les nombreux piézomètres de l'IGC, et les complètera par les données qualitatives sur les eaux d'exhaure recensées par les Services Techniques de l'Eau et de l'Assainissement de la Ville de Paris. Afin de compléter cette base où de besoin, des échantillons seront également collectés et analysés.

Un couplage CaWaQS-CHESS sera ensuite mis en place afin de simuler l'état chimique des eaux du sous-sol à l'échelle de l'ensemble de l'agglomération. Dans la seconde partie de la phase, il servira à



contraindre des modèles locaux de sites pilotes au droit de projets de désimperméabilisation qui auront été définis dès 2019 avec l'IGC.

Co-financement :

Un soutien de cette action via une bourse de thèse sera recherché. Parmi les pistes possibles, les dispositifs Paris CIFRE, le RGF bassin parisien, ou encore les appels à propositions de l'ADEME sont d'ores et déjà identifiés.



5. Axe 5 : Dynamique des contaminants : de la compréhension des processus au métabolisme territorial (A. Gélabert, H. Blanchoud)

Le PIREN-Seine s'intéresse à un large panel de micropolluants et à leurs effets associés sur les microorganismes. Différentes approches ont été développées afin de caractériser cette contamination (archives sédimentaires, continuum sur l'axe fluvial, etc.) ou de mettre en lumière ces effets (transfert dans la chaîne trophique, effet sur le vivant, etc.). Il s'agira d'identifier des nouveaux enjeux liés aux micropolluants dans un cadre cognitif allant, en fonction des connaissances actuelles, de la caractérisation de l'état de contamination du système à une conceptualisation en termes de métabolisme territorial qui permet notamment de relier des pratiques à un état. Il est ainsi envisagé de combiner un « métabolisme des matériaux » (entrée - bilan - usages de la Société) avec un « métabolisme environnemental » (processus dans le milieu - interactions avec le biote). Quatre blocs thématiques seront ainsi constitués qui permettront d'appréhender la problématique du cycle des contaminants.

Si les actions proposées sont affichées par bloc, il faut garder à l'esprit la cohérence de l'ensemble. Le changement d'échelle entre les expérimentations en batch et le bassin de la Seine sont nécessaires pour une meilleure compréhension du fonctionnement global et la détermination des formalismes pour la modélisation.

L'étude de la dynamique des contaminants est fortement liée à des actions de terrain. Autant que possible, elles sont menées sur l'axe Seine de Marnay à Poses, mais d'autres sites sont également suivis de par leur représentativité d'usage des sols : le bassin de l'Orgeval pour les contaminants d'origine agricole et l'Orge pour ceux d'origine urbaine. Les travaux de cet axe mettront l'accent sur :

- Le métabolisme territorial des plastiques et de nanoparticules
- Le déploiement d'échantillonneurs passifs et d'échantillonnage non ciblé couplé à des biomarqueurs
- Effets écotoxicologiques
- Approche prospective des contaminants

BLOC 5.1. Transfert des contaminants à l'échelle du Bassin versant de la Seine

Il s'agira ici de renseigner des entrées, des flux, des sorties de système et l'évolution de la spéciation pour plusieurs classes de contaminants. Cette estimation du métabolisme est réalisable pour des

polluants et molécules bénéficiant déjà d'un suivi assez poussé, effectué en phase VII, et pour lesquels il est possible d'identifier les sources. En particulier, deux contaminants encore émergents pour lesquels la quantification précise de la présence en Seine reste à affiner seront étudiés : les nanoparticules manufacturées et les microplastiques. La compréhension des flux le long de l'axe fluvial (Marnay, Bougival, Triel, Poses) sera privilégiée, en portant une attention particulière aux conditions extrêmes telles que les crues et les périodes d'étiage. Les sources et les niveaux de contamination de molécules émergentes seront également étudiés comme le métaldéhyde (mollusquicide) et le metformine (antidiabétique). Un premier bilan sera établi sur l'axe Seine en lien avec les usages, mais également les rejets potentiels par les stations d'épuration. Enfin, les investigations sur l'évolution de la qualité de matière organique dans le bassin versant de la Seine seront poursuivies dans le cadre de son lien avec les polluants.

5.1.1 Microplastiques dans le bassin de la Seine : des études locales au bassin versant Seine

La contamination des milieux naturels par les microplastiques (MP) constitue une problématique environnementale importante dont l'étude a été abordée au cours de la phase VII. Le bilan de quantification des flux effectué sera affiné, en prenant notamment en compte les différentes formes et tailles de plastiques ainsi que les dynamiques saisonnières associées à leur présence en Seine. Trois actions principales sont ainsi envisagées en plus du suivi des rejets urbains étudiés par le programme OPUR :

- Dosage des microplastiques par Pyr-GCMS
- Micro et macroplastiques sur l'axe fluvial Seine et les têtes de bassins
- Les microplastiques dans les archives sédimentaires

Différents protocoles ont été développés à ce jour pour isoler les MP des matrices environnementales (séparation densimétrique seule ou couplée avec une digestion de la matière organique). Une fois isolés, les MP sont généralement observés sous loupe binoculaire, comptés et caractérisés par spectroscopie infrarouge ou Raman. Ces comptages et caractérisations sont extrêmement chronophages car ces étapes ne sont pas automatisées et procèdent particule par particule. De plus, cette approche ne permet pas d'accéder aux particules les plus petites et se heurte à des limitations quant à l'identification des polymères. Face à ces obstacles, la pyrolyse - chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (Pyr-CG-SM) offre une opportunité intéressante pour accéder à une analyse moléculaire des MP, sans limite de taille. L'objectif de cette action est de mettre au point une méthode d'analyse qualitative et quantitative des microplastiques par Pyr-CG-SM. De 6 à 7 des polymères usuels et fréquemment observés dans le milieu (polyéthylène, polypropylène, etc.) seront testés et ces développements analytiques seront appliqués à l'analyse de MP de divers échantillons prélevés en Seine préalablement étudiés par les approches classiques. La comparaison des résultats obtenus permettra d'évaluer la puissance de cette nouvelle méthode.

Les microplastiques (< 5 mm) sont étudiés dans le cadre du PIREN-Seine depuis le début de la phase VII. Les premiers travaux, pour partie réalisés dans le cadre de la thèse de Rachid Dris (soutenue en décembre 2016) puis celle de Robin Treilles (octobre 2017 – octobre 2020), permettent de fournir des premiers éléments sur la contamination de l'axe fluvial par les microplastiques qu'il s'agisse de fibres textiles ou des fragments. Dans la continuité des travaux menés en seconde partie de la phase VII du PIREN-Seine (2018 et 2019), l'influence des conditions hydrodynamiques et des événements extrêmes (crues et période d'étiage sévère) sur la contamination en MP sur l'axe fluvial Seine sera



étudiée. Un travail sur la contamination des têtes de bassins, contamination à ce jour non documentée, sera également entrepris. Les sites atelier du PIREN-Seine (Marnay, Bougival, Triel et Poses) pour l'axe fluvial Seine, et le bassin de l'Orgeval pour les têtes de bassins seront considérés.

L'étude des macroplastiques (> 5 mm) a débuté en octobre 2018 dans le cadre du post-doctorat de R. Tramoy, financé par le Ministère de la Transition Énergétique et Solidaire (octobre 2017 – mars 2020). Les objectifs des travaux engagés sont d'évaluer les flux de macrodéchets déversés en mer à l'échelle du bassin de la Seine, afin de mieux orienter et de mettre en perspective les actions relatives à la mise en œuvre de la Directive Cadre de Surveillance du Milieu Marin (DCSMM) et à la réduction des déchets marins. Alors que des premières estimations de flux de déchets plastiques sont proposées dans le cadre de ce travail grâce à des expérimentations et des suivis sur la partie estuarienne du bassin de la Seine (projet Macro-Plast), un focus sur la zone centrale du bassin et en Île-de-France est proposé dans le cadre de la phase 8 du PIREN-Seine. Différentes approches comme le traçage du devenir d'objets par GPS ou le lâché d'objets marqués seront développés pour appréhender la dynamique des déchets plastiques sur la zone centrale et à l'aval immédiat de Paris. Des approches de science participative pourraient être également menées sur cette thématique. Comme pour les microplastiques, l'importance des épisodes de crues sera étudiée.

Pour finir, l'historique de contamination en MP dans la Seine sera analysé en fin de phase à partir de l'analyse de carottes sédimentaires en lien avec l'action 5.4.2, p.90. De premiers tests de détection des microplastiques dans les carottes seront réalisés.

Programme 2020 - 2021 :

En 2020, la méthode analytique par spectrométrie de masse (Pyr-CG-SM) sera développée et validée pour différents polymères (droite d'étalonnage, linéarité, sensibilité, etc.). Les 7 polymères usuels et fréquemment observés dans le milieu (polyéthylène, polypropylène, etc.) seront testés. L'année suivante, en 2021, selon les résultats obtenus la méthode pourra être appliquée à différents échantillons environnementaux préalablement étudiés par les approches classiques.

Différentes campagnes en fonction des différentes conditions de débits seront menées en 2020 et 2021 sur le site de l'Orgeval et les sites ateliers du PIREN-Seine pour l'analyse des microplastiques. Deux à trois campagnes sur chaque site seront envisagées chaque année. Des campagnes spécifiques pourront être mises en place en cas de crue importante. En ce qui concerne, les macroplastiques, des premières expérimentations seront menées afin d'évaluer le flux de débris plastiques à l'aval immédiat de Paris et le flux de débris plastiques en période de crues.

Co-financement :

Un stage de master 2 de 6 mois en 2019 sera effectué sur ressources propres pour le dosage de microplastiques par Pyr-GCMS et une bourse de thèse sera sollicitée en septembre 2019. Par ailleurs, pour la détection de micro et macroplastiques sur l'axe fluvial Seine et les têtes de bassins, une thèse est en cours (R. Treilles, Élève ingénieur ENTPE), avec soutenance prévue fin 2020. Le projet Macro-Plast (Ministère) est en cours avec un post-doctorant, R. Tramoy, financé jusqu'à mi-2020. Enfin, le projet Plastic-Seine, CPER-GIP Seine aval est en cours.

Dans le cadre d'OPUR, les effluents urbains sont également suivis (eaux usées et eaux pluviales) en mobilisant la spectroscopie infrarouge. Dans le PIREN Seine les eaux de surface seront quant à elles échantillonnées par pyrolyse GC-MS. Des comparaisons méthodologiques pourront être réalisées dans le cadre de la ZA Seine afin de comparer les différentes méthodologies spectroscopiques et basées sur la pyrolyse GC-MS.

5.1.2 Sources et flux de nanoparticules manufacturées

Devant la production croissante de nanoparticules (NPs) et leur utilisation dans l'industrie, les nouvelles technologies ou encore les cosmétiques, il semble inévitable qu'une partie de ces NPs soit libérée accidentellement dans les milieux naturels. Leur forte réactivité pose de nombreuses questions quant à leur impact sur les écosystèmes et l'homme, et il est ainsi crucial de pouvoir quantifier leur présence dans l'environnement. Les études précédentes dans le cadre de la phase VII, réalisées sur des petits bassins versants d'Ile de France, ont démontrées que les concentrations en masse et en nombre de nanoparticules (TiO_2 et Ag) variaient en fonction du type d'usage des sols (forêt, agricole Urbain). Un des objectifs de cette phase est de mesurer ces flux à une échelle plus importante pour identifier les contributeurs majeurs du bassin versant de la Seine. Par ailleurs, les événements hydro-climatiques exceptionnels peuvent aussi nous permettre de mieux estimer les flux globaux de NPs et n'ont à ce jour jamais été échantillonnés. Il faut donc aussi quantifier les flux de nano-phases (Ag et TiO_2 et oxydes de fer) transportées lors de ces événements déterminants dans les bilans de flux de matière. Cependant pour une bonne évaluation de ces flux, des outils intégrant les masses transportées sur une période donnée sont nécessaires pour obtenir des estimations les plus fiables possibles. À cet effet, les dreissènes seront mobilisées comme outil intégrateur des flux de NPs circulant dans les eaux au cours d'une période d'exposition contrôlée. Enfin, une source atmosphérique potentielle est utilisée pour interpréter nos travaux précédents sur Ag-NPs notamment. Ainsi, un dernier objectif sera de déterminer la nature et la concentration des NPs pouvant contribuer aux sources identifiées dans les sols via des dépôts atmosphériques.

Programme 2020 - 2021 :

Ces travaux se déclineront en 3 actions qui seront dupliquées les deux premières années :

- les concentrations en NPs de Ti, d'Ag et de Fe sur les 3 sites références de l'axe Seine (Marnay, Bougival, Triel) seront mesurées en débit de base, puis lors de deux crues ou débit majeur (total 3 missions/an).
- l'utilisation des Dreissènes sera testée sur ces mêmes sites comme outils intégrateur du flux de NPs. Dans ce cas, les NPs de TiO_2 et de Fe seront ciblées prioritairement.
- un protocole de prélèvement des NPs atmosphériques via la végétation (écorce, feuille, mousse) sera mis en place pour mieux identifier les sources atmosphériques de ces particules pour lesquelles aucune information n'est disponible actuellement. Ici, les NPs d'Ag et de TiO_2 seront ciblées. Ces observations seront complétées par des prélèvements sur deux stations de Airparif (urbain : Paris, trafic : boulevard périphérique) à l'aide d'un impacteur (en collaboration avec l'action 5.2.3, p.81).

5.1.3 Recherche de nouveaux contaminants le long de l'axe Seine Marnay / Bougival / Triel/ Poses

Depuis la création du PIREN Seine, les micropolluants recherchés ont considérablement évolué, depuis les PCBs et organochlorés, jusqu'aux chloroalcanes, en passant par les HAPs, les sulfonylurées ou les PBDEs. De nouveaux contaminants présentent un intérêt croissant de par leur utilisation plus intensive ou leur mise sur le marché récente. Ces usages deviennent problématiques quand leur détection dans le milieu aquatique est récurrente et qu'ils perturbent le traitement de l'eau.

Cette action nécessite dans un premier temps un développement analytique préalable au suivi dans les eaux naturelles. Nous nous proposons de mener une étude exploratoire sur deux molécules



d'intérêt : le métaldéhyde (un mollusquicide) et le metformine (un antidiabétique). Ces substances sont présentes dans les cours d'eau à des concentrations parfois élevées ($> 1\mu\text{g/L}$ pour le metformine dans le lac Léman) ; et même dans l'eau du robinet de façon ponctuelle ($0,24\mu\text{g/L}$ pour le métaldéhyde, rapport ARS Loire Atlantique, 2015). L'étude proposée ici est d'intégrer le suivi de ces deux molécules sur l'axe Seine et d'identifier les sources de contamination.

Programme 2020 - 2021 :

Après une phase méthodologique et un bilan des usages la 1^{ère} année, le suivi de ces molécules sera réalisé le long de l'axe Seine à raison de deux prélèvements par an. Une campagne synchrone sera également réalisée pour l'estimation des rejets de différentes stations d'épuration en metformine, en lien avec les actions de caractérisation des rejets (4.2.2, p.63), et de transfert des micropolluants dans l'axe Seine (4.4.1, p.68) de l'axe 4.

5.1.4 Suivi de la qualité de la MO le long de l'axe Seine Marnay / Bougival / Triel/ Poses

Malgré son rôle environnemental important, la caractérisation détaillée de la matière organique (MO) ainsi que sa dynamique dans les écosystèmes aquatiques restent encore largement méconnues. L'investigation des sources et de la variabilité spatio-temporelle de la MOD dans le bassin de la Seine a été initiée lors de la phase VI du PIREN-Seine. Nous avons montré tout le potentiel de l'analyse globale par fluorescence 3D pour déterminer les différentes sources/qualités/réactivités de la MOD et la variabilité spatio-temporelle de ses propriétés (Varrault et al., 2016). Afin de connaître plus précisément les facteurs contrôlant sa chimiodiversité, sa réactivité, son évolution dans le milieu naturel ou encore au cours des processus d'épuration, nous avons entrepris lors de la phase VII de coupler à l'analyse globale des propriétés optiques une caractérisation structurale plus fine de la MO. Les premiers résultats obtenus ont déjà permis de mettre en évidence une grande variabilité spatiale et temporelle des caractéristiques de la MO dissoute (MOD) et particulaire (MOP) dans les sites ateliers de la Vallée de Seine et de l'Orge. Cette variabilité traduit l'hétérogénéité des constituants de la MO, de ses sources et des processus de transformation (Goffin et al., 2017).

Il est proposé de poursuivre le suivi de la MOD des trois sites (Marnay / Bougival / Triel) commencé sur la phase 7. L'enjeu est toujours de coupler les prélèvements pour la caractérisation de la MOD avec ceux pour l'étude des contaminants / bioaccumulation pour pouvoir faire le lien entre dynamique de la MOD et écodynamique des contaminants et leurs impacts. Il est proposé également de rajouter le site de Poses à ce suivi de l'axe Seine afin de faire le lien avec les travaux en cours sur l'estuaire de Seine (programme Seine-Aval).

En fonction des quantités de matériel disponible, la MOP sera caractérisée en parallèle de la MOD comme lors de la phase VII. Les échantillons prélevés le long de l'axe Marnay / Bougival / Triel / Poses, et qui seront concentrés par osmose inverse / électrodialyse dans le cadre de cette action, serviront également aux mesures de bio/photodégradabilité de la MO. En effet, une caractérisation fine de la MO dissoute et particulaire par résonance magnétique nucléaire du carbone et pyrolyse couplée à la chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse sera effectuée. Nous chercherons ainsi à relier les propriétés optiques de la MO aux caractéristiques structurales et moléculaire de cette dernière et à son potentiel de bio/photo-dégradabilité. Cette approche sera tout à fait complémentaire des mesures de biodégradabilité qui seront entreprises dans les actions sur l'Orgeval (action 2.2.1, p.35), sur les Eaux Urbaines (action 4.2.4, p.65), et sur la Bassée (action

3.2.5, p.50). Cette caractérisation fine permettra d'enrichir les données et la réflexion sur les indicateurs de dégradabilité de la MO à intégrer dans le modèle RIVE. La caractérisation de la MO dans la colonne d'eau le long de l'axe Seine viendra également en complément de celle des biofilms prévues dans le cadre de l'action 5.2.1, p.78. Les propriétés de la MO dans la colonne d'eau et les biofilms seront comparées. Cela permettra préciser les sources et la réactivité de la MO qui sont étroitement liées aux capacités de piégeage/dégradation des contaminants par les biofilms.

Programme 2020 - 2021 :

Deux campagnes de prélèvements par an sont prévues en situations hydrologiques et/ou saisonnières contrastées sur 2 ou 3 ans. Une de ces deux campagnes sera commune à celle réalisée pour l'action 5.3.1, p.85, « Biosurveillance de la qualité écotoxicologique, chimique et sanitaire au niveau du bassin de la Seine » prévue une fois par an à l'automne (échantillonnage des sites de Marnay, Bougival et Triel). Pour la deuxième campagne, un suivi haute fréquence de la MOD par fluorescence 3D étant prévu (action 4.2.4, p.65), il permettra un choix pertinent des dates de prélèvements des gros volumes d'eau à Bougival et Triel pour cette approche combinée, globale et moléculaire. Le site de Marnay sera quant à lui échantillonné, à la même période, dans le cadre du suivi de la Bassée. Enfin, les campagnes d'échantillonnage communes avec l'action sur les biofilms (action 5.2.1, p.78), 3 fois en 2 ans, seront réalisées.

BLOC 5.2. Processus bio-physico-chimiques des contaminants à l'échelle locale

Pour certains contaminants, la connaissance fine de leur cycle dans le bassin versant de la Seine passe nécessairement par une compréhension de processus clés, associés à l'échelle locale. Ainsi, certains milieux sont propices à la dégradation naturelle, au piégeage, à la transformation, ou aux échanges de contaminants organiques (fluoroalkylés, antibiotiques, HAPs, herbicides, ...) et de métaux. Ces processus font intervenir diverses interfaces réactives (interfaces eau – sédiment, surfaces minérales ou encore biofilms microbiens) pour lesquelles des conditions physico-chimiques et redox ainsi que la présence de matière organique représentent un enjeu pour la résilience des milieux contaminés. Au niveau de la zone humide de la Bassée, des échanges intéressants ont pu être observés, il apparaît aujourd'hui important d'en comprendre les dynamiques et de déterminer les paramètres contrôlant ces processus. D'autres sites sont d'intérêt au regard des contaminations plus marquées en divers micropolluants (antimoine, pesticides, antibiotiques...) et pour lesquels ces processus (dégradation, transformations, vieillissement de la matière organique) seront plus facilement quantifiables.

5.2.1 Les biofilms dans le cycle des polluants

Les interfaces biofilm/minéral constituent un compartiment majeur des milieux naturels que l'on retrouve par exemple dans les sols, et les sédiments. Ces structures dans lesquelles les cellules sont encapsulées dans une matrice d'exopolymères auto-sécrétée constituent le mode d'organisation principal des microorganismes (bactéries, archées, microalgues) dans l'environnement. Leur organisation tri-dimensionnelle, semblable aux gels, impose un transport limité pour les éléments chimiques. Cette faible perméabilité des biofilms, associée à l'activité métabolique des microorganismes qui les composent et à la forte densité de sites fonctionnels qu'ils contiennent,

permet une réactivité forte de l'interface biofilm/minéral. Cette réactivité a pu être mise en avant dans de nombreuses études de laboratoire qui montrent que ces interfaces contrôlent en partie le cycle des polluants métalliques dans l'environnement. Ces études mettent en avant d'une part les propriétés d'accumulation des biofilms pour les éléments traces métalliques, mais aussi le rôle de « réacteur » permettant sous certaines conditions de modifier leur spéciation (oxydation/réduction, précipitation de phases secondaires). De la même manière des travaux préliminaires effectués lors de la phase VI du PIREN Seine soulignent leurs capacités de piégeage des polluants organiques (HAP, PCB, composés perfluoroalkylés, antibiotiques...), avec des implications en termes de transfert vers le réseau trophique. En revanche, la quantification précise et l'impact réel des biofilms sur le devenir des micropolluants reste encore très mal renseignés dans les milieux naturels. Ceci touche notamment aux questions des flux de polluants mais aussi aux modifications de spéciation (métaux) qui impactent leur transport ou leur biodisponibilité, ou qui entraînent leur dégradation dans le cas des substances organiques susceptibles d'être métabolisées ou oxydées.

L'objectif général de cette action est d'estimer la contribution des biofilms sur les flux de polluants, métalliques ou organiques, dans le bassin de la Seine. Cette action repose dans un premier temps sur une approche in situ en positionnant des pièges à biofilms sur les sites d'intérêt, et s'appuie sur une stratégie multidisciplinaire combinant géochimie et écologie moléculaire. Cette action propose ainsi de :

- Quantifier la capacité de piégeage de biofilms par rapport à la colonne d'eau pour les métaux et contaminants organiques sélectionnés (fluoroalkylés, pesticides, antibiotiques), mais aussi pour la matière organique.
- Évaluer le rôle des biofilms dans la spéciation des polluants métalliques, et la transformation/dégradation des polluants organiques ou de la matière organique dissoute (précipitation de minéraux secondaires dans l'épaisseur des biofilms, (bio)accumulation, (bio)sorption de polluants organiques et inorganiques, (bio)transformations redox)), et ainsi déterminer comment le cycle de ces composés naturels et anthropiques peut être affecté par cette interface réactive.
- En parallèle une recherche des gènes et/ou microorganismes impliqués dans les processus d'interaction avec les métaux, de changement de spéciation et/ou de dégradation de la matière organique sera réalisée par une approche métagénomique. Les microorganismes (bactérie ou archées) identifiés pourront être isolés dans un second temps pour évaluer leur capacité de piégeage (polluants métalliques ou organiques), de modification de la spéciation ou de dégradation (pesticides).

Programme 2020 - 2021 :

Pour ce faire, sur l'axe Seine, aux 4 points de prélèvements (Marnay, Bougival, Triel, Poses), seront déployés des pièges à biofilms durant 1 mois, 3 fois en 2 ans. Les concentrations en métaux, polluants organiques (fluoroalkylés, pesticides, antibiotiques) et MO (dissoute et particulaire) seront mesurées dans le biofilm et dans la colonne d'eau. Une mise au point sur des protocoles d'extraction sera nécessaire pour faire la distinction entre éléments/molécules internalisés dans les cellules, adsorbés sur les parois cellulaires, et présents dans le biofilm en milieu extracellulaire. Ainsi, des coefficients de partage seront définis entre biofilm et colonne d'eau, permettant d'accéder aux capacités d'accumulation des biofilms, et de quantifier leur impact sur les flux de micropolluants aux 4 sites identifiés. L'identification des contaminants organiques sera effectuée en lien étroit avec l'action 5.3.2, p.86, sur les micropolluants d'intérêt émergent.

Pour les métaux, il s'agira ensuite de déterminer quelles sont les phases minérales néoformées dans les biofilms prélevés en Seine, à l'aide d'approches de microscopie électronique, et spectroscopiques

(RAMAN, XPS, XAS). Par ailleurs, la recherche des molécules issues de la dégradation des polluants organiques sera effectuée, ainsi qu’une identification de la qualité de la MO (fluorescence 3D pour la phase dissoute et lipides pour la phase particulaire) qui sera comparée à la qualité de MO de la colonne d’eau afin d’en déterminer une éventuelle dégradation, en lien étroit avec le suivi de la dynamique de la MO de la colonne d’eau (action 5.1.4, p.77).

Simultanément, des approches de métagénomique seront mises en place pour identifier les populations de microorganismes pour les quatre sites et les 3 campagnes. Cela permettra de mettre en relation communautés microbiennes et exposition continue aux contaminants. De plus, la quantification de marqueurs spécifiques de contamination (pompe à efflux pour les métaux et antibiotiques) dans les différents biofilms sera effectuée.

Enfin, en 3^{ème} et 4^{ème} année seront effectuées des incubations, au laboratoire, en mésocosme, avec exposition des biofilms à des polluants organiques, de la matière organique et métaux (Mn présent en Seine en concentration non-négligeables, Cr polluant métallique dont le cycle dépend de Mn). Un suivi en conditions réalistes du devenir de ces polluants et MO dissoute et particulaire (dégradation, accumulation) sera réalisé dans ces conditions contrôlées. Les données en laboratoire obtenues seront comparées aux données de terrain. L’évolution de l’état redox de (Mn, Cr) sera déterminée dans le biofilm, notamment par approches spectroscopiques.

Co-financement :

Actuellement, un programme ANSES est en cours sur la dissémination de l’antibiorésistance dans l’Orge.

5.2.2 Dégradation naturelle des contaminants organiques aux interfaces redox

L’identification de processus qui peuvent conduire naturellement à la dégradation de certains contaminants organiques représente un enjeu pour la résilience des milieux contaminés. A cet égard, les minéraux contenant du Fe(II) sont désormais reconnus comme des catalyseurs de réactions de type Fenton hétérogène (Liu et al., 2016). Très peu d’études se sont intéressées aux réactions de dégradation hétérogènes impliquant seulement l’oxygène O₂ comme source de radicaux libres et surtout, à leur rôle possible dans le milieu naturel (Tong et al., 2016). Dans ce contexte, nous avons mis en évidence la dégradation d’un antibiotique, l’acide nalidixique, après son adsorption à la surface de nanoparticules de magnétite, en présence d’O₂ dissous à pH neutre (Ardo et al., 2015). Sur cette base, le projet se propose de quantifier l’importance de la dégradation naturelle des contaminants organiques par des minéraux des interfaces redox de l’environnement.

Les contaminants cibles sont des polluants émergents tels que les composés fluoroalkylés (PFAS ciblées / détermination PFAS totaux et accès au pool "oxydable") ou des produits pharmaceutiques tels que le sulfaméthoxazole, ainsi que des polluants historiques encore très présents dans le bassin de la Seine : les HAPs, et des herbicides de type triazines et phénylurées.

Les milieux cibles sont des zones qui présentent des cycles redox favorables à la dégradation oxydative des contaminants organiques : les sédiments de berge ou laisses de crues (ex. banquettes de l’Orge) et les sols des zones humides (ex. site atelier de la Bassée dont les eaux sont une ressource stratégique).

Les minéraux cibles sont les oxydes de fer, les argiles et les sulfures qui sont naturellement présents dans ces milieux, et dont nous maîtrisons l’analyse fine in-situ (redox, structure moléculaire,



surfaces) (Le Pape et al., 2014; Priadi et al., 2012). Nous développerons également l'analyse in-situ des radicaux libres par spectrométrie RPE (Liu et al., 2016; Morin and Bonnin, 1999).

Programme 2020 - 2021 :

En 2020 des expériences d'oxydation en batch seront réalisées sur 2 ou 3 échantillons de type sédiment et sol représentatifs des interfaces redox du bassin, prélevés sur les sites de la Bassée (interfaces nappe-rivière), de l'Orge (site urbain) et de l'Orgeval (site agricole). Ces échantillons seront dopés par un cocktail de polluants aux concentrations typiques des contaminations du bassin et seront soumises à des incubations de type cycles redox afin d'évaluer la dégradation des polluants et la production de radicaux libres. Les contaminants organiques seront dosés par LC-ESI-MS/MS et les radicaux libres seront dosés par RPE spin trapping. En parallèle, la spéciation du fer dans les phases réactives sera suivie par spectroscopie d'absorption X. Les paramètres physicochimiques des solides et des eaux porales, incluant pH, Eh, oxygène dissous, carbone organique et inorganique, éléments majeurs et mineurs, seront suivis pour caractériser précisément les conditions d'incubations.

En 2021, des produits de dégradation et des mécanismes réactionnels aux interfaces minéraux-matière organique seront recherchés pour les polluants les mieux dégradés. Ces mesures seront menées sur les incubations du même type que celles de la première année, sur des échantillons dopés, mais sera focalisée sur les voies de dégradation des polluants les mieux dégradés. Cette partie bénéficiera de l'expertise des équipes impliquées sur les voies de dégradation de certains polluants visés.

En fin de phase, des suivis in situ de la dégradation de polluants déjà présents dans des sols et sédiments du Bassin de la Seine seront réalisés. Au stade actuel des connaissances, il est encore très difficile d'évaluer l'importance potentielle de ces processus de dégradation naturelle des contaminants organiques. Les études récentes citées ici suggèrent pourtant qu'ils pourraient jouer un rôle encore mal évalué dans le cycle des contaminants. Le projet a pour objectif d'évaluer l'importance de ces processus sur des sites représentatifs afin de mieux évaluer le devenir ultime des contaminants dans le bassin de la Seine.

Co-financement :

Un stage Master 2 permettra la mise au point de la détection de radicaux libres par RPE spin-trapping sur le système modèle magnétite/O₂ (co-financement projet Labex MATISSE IMPMC-LRS)

5.2.3 Identification de la phase porteuse des micropolluants dans les particules atmosphériques

La pollution par les micropolluants organiques du compartiment atmosphérique a fait l'objet de plusieurs études dans le cadre du PIREN Seine. Il a été mis en évidence l'importance de ce compartiment dans le transfert de cette pollution des milieux urbains vers les têtes de bassins versant expliquant ainsi l'origine de la pollution très en amont des sources de pollution. L'émission de ces molécules dans l'air, sous forme gazeuse ou particulaire par des processus de volatilisation ou de combustion, se sont diversifiées et intensifiées, entraînant une pollution croissante de l'air, surtout en milieu urbain. Les objectifs de cette action sont d'appréhender la distribution des micropolluants organiques sur les particules atmosphériques en fonction des différentes tailles de particules : TSP (total suspended particle) et les deux classes de PM (particulate matter) qui font

l’objet de normes de qualité en France, PM10 (< 10 µm) et PM2,5 (< 2,5 µm). Une meilleure connaissance de cette distribution permettra de mieux caractériser les processus atmosphériques comme par exemple, le potentiel de transport atmosphérique à longue distance ou les processus de transfert vers la phase aqueuse lors des dépôts humides. Il existe quelques études traitant de la distribution d'une ou deux familles de composés perturbateurs endocriniens et la dangerosité associée sur le plan international mais très peu d'études concernent la multi-contamination.

Nous nous focaliserons sur une large gamme de perturbateurs endocriniens (PE, 59 molécules, 8 familles : PCB, HAP, Alkylphénols, PBDE, Organochlorés, Phtalates, Parabènes, Pesticides).

Programme 2020 - 2021 :

Dans un premier temps, les particules seront prélevées sur deux stations de Airparif (urbain : Paris, trafic : boulevard périphérique) lors de deux saisons (froide/chaude) sur une année à l'aide d'un impacteur. Les effets toxicologiques de ces retombées seront également suivis (perturbateurs endocriniens, dioxin-like, génotoxiques). Ces mesures seront également complétées par un suivi saisonnier sur une année du site urbain et d'un site rural (Boissy). Pour cette seconde partie, nous nous attacherons à comprendre les interactions entre les phases gazeuses, particulaires et les retombées humides.

Co-financement :

Dans le cadre de projets déposés à l'ANR (ENDOPART) et à l'ANSES (PERTURBAN), les effets toxicologiques associés à ces particules seront suivis de manière plus approfondie. Ces deux projets ont été présélectionnés pour la deuxième étape de sélection des appels à projets 2019. Ce projet bénéficie également d'une bourse doctorale 2018-2021 (ED SIEB EPHE).

5.2.4 Sources, processus de transfert et écotoxicologie de la contamination urbaine par l’antimoine

Cette action vise à retracer la trajectoire historique de l’antimoine, un contaminant urbain émergent (changement technologique), qui a déjà un lourd passé de contamination, mais qui est globalement peu connu. Ainsi, le projet s’intéressa aux sources anciennes et actuelles d’antimoine en milieu urbain, ainsi qu’à son transfert dans les hydrosystèmes sous forte pression anthropique. L’augmentation des enrichissements en Sb liés à l’urbanisation lors des dernières décennies dans le bassin versant de la Seine justifie la réalisation d’un suivi des caractéristiques de cette contamination (spéciation, mobilité, écotoxicité, transferts). Les résultats obtenus donneront des indices sur les étapes clés qui contrôlent le cycle biogéochimique de ce contaminant, étapes qui restent à l’heure actuelle peu décrites dans la littérature. Trois volets complémentaires seront mis en œuvre pour mieux comprendre le cycle biogéochimique de ce contaminant émergent en milieu urbain. Le couplage d’outils isotopiques et radio-isotopiques permettra de discriminer les sources (anciennes et récentes) et d’évaluer les temps de transfert de la contamination, dans l’objectif de guider des pratiques de gestion durable des flux urbains. L’utilisation de la spectroscopie d’absorption des rayons X, permettra de déterminer la spéciation de l’antimoine en phase solide et d’évaluer sa mobilité (entre compartiments sol-sédiment-eau, et entre milieu et biote) en fonction de la physico-chimie par extraction en conditions contrôlées. Enfin, l’écotoxicité de l’antimoine sera étudiée pour des écosystèmes cibles représentatifs du bassin versant de la Seine (plaine d’inondation en aval). Ceci a pour objectif de qualifier l’impact réel de cette contamination sur le milieu soumis à des pressions urbaines.

L'antimoine est utilisé pour ses propriétés ignifuges dans la fabrication de matières plastiques, les systèmes de freinage automobile et les produits électroniques. Il est rejeté dans l'environnement urbain via l'incinération des déchets et le trafic routier. Du fait de sa faible concentration naturelle, l'augmentation soudaine de sa concentration observée dès 2002 dans l'air et l'eau fait de l'antimoine l'un des éléments métalliques en traces (ETM) les plus enrichis dans les environnements urbains par rapport au fond géochimique. Dans le bassin versant de la Seine, l'histoire de l'antimoine est étroitement associée à celle du plomb du fait de l'existence de sources communes (par exemple, l'antimoine est souvent présent dans les alliages à base de plomb). La Seine est le premier bassin versant anthropisé où l'émergence de la contamination par l'antimoine a été montrée hors de tout impact minier, et le seul où l'origine « automobile » de cette contamination a été montrée sans ambiguïté. Bien que certaines de ces sources soient localement identifiées, il est pour le moment impossible de quantifier la part de ces sources dans le schéma de contamination global. Pour ce faire, il est possible d'utiliser la signature isotopique de l'antimoine, $\delta^{123}\text{Sb}$ comme traceur discriminant des différentes sources dans les matrices liquides et solides contaminées.

Programme 2020 - 2021 :

Les deux premières années seront principalement consacrées à la caractérisation des sources urbaines d'antimoine et des lieux où il se concentre. Les échantillons représentatifs de ces sources sont en partie déjà collectés (bord de routes, sols urbains, garniture de freins, eau et sédiments, nombreux artefacts en plomb de divers époques, ...), les autres feront l'objet de collecte (bassins de rétention autoroutiers). Au départ de l'action, le site d'étude sera le bassin de l'Orge dont le fort gradient d'urbanisation amont-aval et la réactivité aux phénomènes météorologiques sont des atouts pour étudier les processus modulant le cycle biogéochimique de Sb. Une fois les sources et les processus bien caractérisés, l'intégration de données issues de l'action 5.4.2, p.90, sur les archives sédimentaires, permettra de reconstruire les contributions actuelles et passées des différentes sources et voies de transfert, y compris atmosphérique, à la contamination de la Seine, à l'échelle du bassin et du siècle dernier et de les confronter aux modifications de réglementation et de technologie.

Les sources anciennes et actuelles d'antimoine en milieu urbain seront déterminées par l'étude du rapport Pb/Sb. Bien que le système isotopique $^{123}\text{Sb}/^{121}\text{Sb}$ soit encore peu exploré, la gamme de variation de la composition isotopique de Sb mesurée à ce jour dans les environnements de surface est suffisamment large ($\delta^{123}\text{Sb} \sim 1.5\%$) pour que ce système soit potentiellement applicable comme traceur géochimique (Rouxel et al., 2003). La mesure des isotopes de Sb sur un bassin versant bien caractérisé (sources de Sb connues, important jeu de données géochimiques et isotopiques disponibles) tel que celui de l'Orge, permettra de tester le potentiel des isotopes de l'antimoine comme traceur de sources sur les bassins versants anthropisés.

Les formes chimiques et les phases porteuses de l'antimoine dans les échantillons du bassin versant de la Seine seront également déterminées. En effet, dans le bassin versant de la Seine, l'antimoine est détecté dans différents compartiments environnementaux) comme les sols, les sédiments de rivières, ou encore les poussières urbaines, ce qui pose la question de la mobilité entre les compartiments et en particulier vers le biote. Puisque sa forme chimique conditionne sa mobilité dans l'environnement et sa toxicité pour les écosystèmes, il est pourtant essentiel de mettre en évidence et de quantifier les formes chimiques de Sb dans les sols et sédiments contaminés. Dans les environnements oxydiques et suboxydiques, l'antimoine se comporte comme un oxyanion, et présente deux formes redox, Sb(V) et Sb(III). En conditions anoxiques, par exemple sous l'interface eau-sédiment, cet élément peut s'associer avec les sulfures produits par sulfato-réduction d'origine bactérienne (e.g. Sb_2S_3). La spéciation de Sb en phase solide peut être déterminée grâce à des

analyses minéralogiques des échantillons par diffraction des rayons X, ainsi que des déterminations du degré d'oxydation de Sb (Sb(V)/Sb(III)) en phase solide grâce à l'absorption des rayons X (XANES) et de l'environnement moléculaire de Sb sur les échantillons sources concentrés (EXAFS). La détermination des phases porteuses de Sb en microscopie électronique associée à la microanalyse (MEB-EDXS) sera effectuée en complément. L'ensemble de ces analyses sera réalisé en préservant l'état rédox des échantillons représentatifs du milieu naturel.

Par ailleurs, sera réalisée l'étude du transfert de Sb à partir de la phase solide vers le compartiment dissous des eaux de surface par extractions chimiques, réalisées en conditions oxiques et anoxiques, afin d'évaluer la mobilité de l'antimoine à partir des phases porteuses préalablement identifiées. Dans la même logique que les analyses minéralogiques, on procédera à ces extractions en premier lieu sur les échantillons de sols et sédiments où l'antimoine est concentré, pour passer progressivement à des échantillons plus dilués.

Le risque de contamination par Sb pour les organismes des sols et de la rivière sera également évalué. Ce volet microbiologique sera basé sur (a) la caractérisation du résistome en quantifiant des gènes conférant la résistance à l'antimoine par qPCR et (b) la caractérisation des communautés microbiennes (bactéries et archées), y compris métaboliquement actives, par une approche de metabarcoding (ADNr 16S). Cette approche moléculaire sera complétée par une approche cultivable permettant de caractériser les souches résistantes. A partir des carottes de sols prélevées dans l'aval de la Seine (action 5.4.2, p.90), une démarche d'écologie moléculaire permettra d'évaluer l'impact de la contamination en antimoine sur la diversité des communautés microbiennes (bactéries et archées) en ciblant les communautés microbiennes totales et métaboliquement actives. Elle permettra aussi de quantifier par qPCR des gènes bactériens impliqués dans la résistance à l'antimoine et codant des pompes permettant l'efflux de l'ion (arsB et acr3p) ainsi que deux enzymes (*anoA* et *aioAB*) impliquées dans l'oxydation de l'antimoine (Sb(III) oxydé en Sb(V) forme moins toxique) afin de vérifier si l'abondance de ces gènes témoigne d'une exposition des communautés microbiennes à des concentrations toxiques en Sb.

En complément, une approche en microcosme réalisée à partir de matières en suspension présentant des concentrations importantes en antimoine (30 - 100 µg/g ; prélevées à proximité de routes et/ou parkings) permettra de caractériser les communautés microbiennes par une approche métagénomique en ayant pour objectif d'identifier une empreinte génétique à savoir des genres microbiens (bactéries et archées) témoignant d'une exposition à l'antimoine (Sb(III) et/ou Sb(V)), et d'isoler et caractériser des souches par une approche cultivable. A l'issue de cette caractérisation d'empreinte génétique, la validation des genres bactériens identifiés sera effectuée dans plusieurs environnements impactés par l'antimoine.

Co-financement :

Une bourse de thèse est demandée au CEA et à l'École Doctorale SMEMaG (Paris Saclay, et un stage M2 financé par la FIRE sera effectué entre LSCE et M2C-METIS.

BLOC 5.3. Interactions biote - contaminants

Le biote est un compartiment actif qui interagit avec les contaminants. Les travaux menés au sein des phases précédentes du PIREN Seine ont permis de caractériser chez différentes espèces sentinelles des marqueurs traduisant des mécanismes d'action variés. Une inter-calibration des réponses fournies par les biomarqueurs chez un trio d'espèces sentinelles (dreissène, gammare, épinoche à



trois épines) représentatif du réseau trophique sur l'axe Seine sera proposée afin de répondre aux attentes concernant la méthodologie de biosurveillance de la contamination du milieu aquatique par les biomarqueurs, la cartographie des risques écotoxiques sur l'ensemble du bassin de la Seine et la proposition de stratégies pour la surveillance de la qualité sanitaire des masses d'eau.

La capacité d'imprégnation de certains contaminants dans le compartiment biologique n'est pas nécessairement en lien avec des marqueurs d'effets mais permet d'évaluer de façon indirecte la contamination de la colonne d'eau. Afin de définir les potentialités bioindicatrices du biote, différents types d'échantillonnage passif du biote, de la colonne d'eau et du transport particulaire seront déployés : organismes encagés, prélèvements de poissons, POCIS feuilles de silicone et pièges à sédiment. Ces résultats seront à mettre en relation avec les travaux sur le rôle des biofilms dans le cycle des micropolluants (action 5.2.1, p.78).

La question des effets de la contamination sur les organismes pourra également être posée selon des approches plus spécifiques en fonction des contaminants en lien avec la contamination du milieu. Dans ce cas, les bassins amont plus spécifiques d'un type de contaminants seront choisis. En milieu agricole, le suivi de l'effet de la contamination en pesticides sur les individus (chabots, goujons) sera mis en place dans le bassin de l'Orgeval.

5.3.1 Diagnostic de la qualité écotoxicologique, chimique et sanitaire au niveau du bassin de la Seine

Les milieux aquatiques sont le réceptacle d'un grand nombre de contaminants émis par les activités humaines souvent sous la forme de rejets complexes (ex : eau épurée des stations de traitement des eaux usées) et qui constituent des contaminations multiples associant des substances chimiques de différentes familles (métaux, polluants organiques...) à des contaminants biologiques (parasites pathogènes ou non, virus...). L'évaluation de la qualité d'une masse d'eau peut être abordée à l'aide d'approches basées sur la mesure des mécanismes de toxicité des polluants. Ces mesures permettent une évaluation prédictive plus explicative de l'impact de la contamination pour les organismes. Les travaux menés au sein du PIREN Seine se sont attachés à caractériser chez la dreissène des marqueurs traduisant des mécanismes d'action variés en lien notamment avec le caractère génotoxique, immunotoxique ou reprotoxique des contaminants environnementaux.

Dans le cadre de cette action, il est proposé un diagnostic écotoxicologique i) à plus large échelle incluant les points de captages et de rejets des eaux qui permettra ainsi l'identification des voies d'entrée puis de transfert des contaminants chimiques et biologiques dans le milieu puis dans le biote, et ii) le suivi d'une espèce sentinelle (mollusque bivalve : la dreissène) via une stratégie de surveillance active (encagement) garantissant d'associer les effets écotoxiques mesurés aux contaminants du milieu.

En complément des analyses menées autour de la contamination parasitaire (protozoaires) de la phase VII, des actions seront menées vis-à-vis de la contamination virale et notamment les bactériophages ARN F-spécifiques (FRNAPH), indicateurs de cette contamination. La surveillance sanitaire des masses d'eaux par la dreissène fera ainsi écho aux actions baignade et risque de contamination par les bactéries fécales (BLOC 4.1, p.55).

Programme 2020 - 2021 :

Les travaux de cette action viseront en premier lieu à définir, entre les différents acteurs (chercheurs du PIREN-Seine et gestionnaires du captage-SEDIF et du traitement des eaux-SIAAP), 10 à 15 sites

d'intérêt pour le diagnostic des qualités écotoxicologique, chimique et sanitaire du continuum aquatique du bassin de la Seine. Les sites d'étude seront définis sur la base de l'historique des actions menées au sein du PIREN-Seine et de la Zone Atelier Seine pour la définition de sites pilotes (ex : Marnay, Bougival, Triel, Poses) ainsi que des réseaux de mesures/surveillance existants en Seine (ex : Réseau MeSeine).

Le suivi des sites est proposé sur les quatre années du programme PIREN Seine, à raison d'une campagne de transplantation par an (période automnale), propice à l'encagement des organismes (dreissènes, épinoches) et à la mesure des réponses biologiques (génotoxicité, immunotoxicité et paramètres physiologiques). La mesure des niveaux d'imprégnation chimique et biologique se fera notamment en synergie avec les actions de suivi des micropolluants d'intérêt émergent (5.3.2, p.86), et des nanoparticules (5.1.2, p.76).

L'ensemble des métriques autour du diagnostic de la qualité des masses d'eau 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., 2016) autour du gammare pour les aspects biomarqueurs et bioaccumulation. Il s'agira ici de poursuivre le développement de cette démarche dans un contexte de biosurveillance plurispécifique (i.e. dreissènes, épinoche) et en ajoutant un volet contamination biologique en plus du volet chimique.

Co-financement :

Cette action viendra en appui de projets en cours : Projet « Sashimi » (2019-2022) – financé par l'Agence Française de la Biodiversité (AFB) et le projet « Biosurveillance » (2019-2022) – financé par l'Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN). Un troisième projet « GénEpi » (en phase d'évaluation) sur l'approche multi-marqueurs de la Génotoxicité chez l'Épinoche à trois épines pour une application en biosurveillance de la qualité des milieux aquatiques a également été déposé auprès de Fonds Régional de Coopération de la région Grand Est-URCA, ED ABIES.

5.3.2 Micropolluants d'intérêt émergent en Seine : niveaux, profils et déterminants de la contamination chez deux organismes sentinelles, la dreissène *Dreissena polymorpha* et le chevesne *Squalius cephalus*

Les enjeux résultant de la diffusion de substances toxiques dans les milieux aquatiques sont au cœur de nombreuses préoccupations scientifiques. La compréhension de l'écodynamique des micropolluants dans les écosystèmes dulçaquicoles s'avère d'autant plus importante et prioritaire que la Directive Cadre sur l'Eau et sa directive fille 2013/39/UE (DCE) ont récemment introduit de nouvelles normes de qualité environnementale concernant le biote (NQEbiote), définies principalement pour le poisson.

Durant la phase VII du PIREN-Seine, les travaux dans ce domaine ont inclus l'étude du transfert trophique de différentes familles de micropolluants, dont des composés organohalogénés d'intérêt émergent, listés pour certains dans la DCE ou la convention de Stockholm sur les Polluants Organiques Persistants (ex : PFOS ou chloroalcanes à chaîne courte). Ces travaux ont été réalisés sur le bassin versant de l'Orge, soumis à de fortes pressions anthropiques (Labadie et al., 2017). Néanmoins, la question de la contamination de la biocénose à plus large échelle spatiale dans le



bassin de la Seine n'a précédemment été traitée dans le PIREN Seine que pour un nombre limité de familles de micropolluants.

Cette action s'inscrit dans ce contexte et vise à poursuivre la collaboration avec le SIAAP, à travers son réseau MeSeine, initiée durant la phase VII du PIREN-Seine. Elle s'appuiera sur l'utilisation de deux organismes sentinelles, la moule zébrée *Dreissena polymorpha* et le chevesne *Squalius Cephalus*. Cette action proposera une étude comparative des niveaux, profils et déterminants de la contamination chez ces deux modèles biologiques susceptibles d'être employés comme bioindicateurs dans les programmes de surveillance. Elle sera réalisée selon un transect longitudinal amont-aval sur l'axe fluvial et sera principalement centrée sur des micropolluants organohalogénés d'intérêt émergent.

Cette action se focalisera sur une liste restreinte de familles de micropolluants pour assurer la complémentarité et la cohérence des données par rapport au suivi réalisé actuellement dans le cadre de MeSeine et par rapport à l'acquisition antérieure de données dans le PIREN-Seine. Ainsi, on travaillera principalement sur deux familles d'intérêt émergent, constituées de composés récemment réglementés ou susceptibles de l'être à court ou moyen terme : les composés fluoroalkylés (PFAS, liste élargie par rapport au suivi MeSeine) et les chloroalcanes, étudiés respectivement depuis les phases V et VII du PIREN Seine. Cependant des tests seront réalisés en seconde partie de phase sur la pertinence de mettre en place des analyses non ciblées permettant de capitaliser une information a priori exhaustive des molécules présentes dans le milieu.

Programme 2020 - 2021 :

Une approche différenciée selon les espèces sentinelle sera mise en œuvre. Pour les dreissènes, le projet étroitement articulé avec l'action « biosurveillance » précédente, inclut le déploiement de pièges à particules et d'échantillonneurs passifs de type POCIS pour intégrer temporellement la contamination de la colonne d'eau. Cette approche permettra ainsi de proposer i) une étude comparative de la contamination de la dreissène et de son milieu d'exposition et ii) une hiérarchisation des voies d'exposition pour des composés aux propriétés physico-chimiques contrastées. Ce volet inclura le dosage des HAP et des PCB, identifiés précédemment comme particulièrement problématiques sur certaines stations de l'axe fluvial. Le suivi se déroulera sur 10-15 sites la première année. Un échantillonnage passif (feuilles de silicone) est également prévu la première année pour les quatre sites de l'axe fluvial. Pour les Chevesnes, le suivi se focalisera sur les composés organohalogénés cités précédemment et comportera une seule campagne sur trois sites (première année). Une dizaine de chevesnes autochtones seront échantillonnés par le SIAAP sur chaque station dans le cadre de MeSeine et les analyses de micropolluants seront réalisées sur le muscle dorsal. L'acquisition de métadonnées permettra de hiérarchiser les facteurs de contrôle potentiels : site, âge, taille, sexe, niveau trophique et régime alimentaire (proxies : isotopes stables C/N et acides gras).

Co-financement :

Ce projet bénéficie du soutien de l'Université de Bordeaux par le biais d'une bourse de thèse démarrée en octobre 2018 (2018-2021).

5.3.3 Impact de la contamination par les pesticides sur les communautés piscicoles

De par leur toxicité et leur utilisation fréquente et à large échelle, les pesticides sont très souvent pointés du doigt comme étant parmi les principaux responsables du déclin de la biodiversité, voire d'effets sur la santé humaine. La contamination mensuelle par les pesticides est maintenant suivie en continu depuis 2008 à la station des Avenelles sur le bassin versant de l'Orgeval dans le cadre du PIREN Seine. Les fluctuations mensuelles de teneurs en pesticides sont comprises entre 1 et 1000 ng/L. c'est le cas pour le S-Métolachlor qui a son maximum de contamination en mai-juin alors que l'isoproturon et le chlortoluron sont majoritairement présents en décembre (Blanchoud et al., 2018). Les résidus d'atrazine sont également encore très présents malgré l'interdiction de son usage en 2003. L'Orgeval, dont le suivi de pesticides est asservi au débit, constitue ainsi un site d'intérêt pour la validation de la quantification par POCIS des flux de pesticides dans les cours d'eau agricole.

Ce suivi de la contamination, couplé aux récents travaux les variations mensuelles des espèces recensées dans le bassin de l'Orgeval par la mesure de l'ADN environnemental (ADNe) (Tallec et al., 2018), permettra d'évaluer des pollutions aux pesticides de l'Orgeval sur ses populations piscicoles.

Programme 2020 - 2021 :

La dynamique de populations de chabots ou de goujons sera suivie par la méthode de « capture – marquage – recapture » par pêches électriques et marquage par PIT-TAG. Les marqueurs étant spécifiques à chaque individu, ils seront suivis au cours du temps dans le cours d'eau. Des prélèvements de sang et de nageoire pelvienne seront effectués sur des individus marqués (chabots) pour :

- suivre l'évolution des marqueurs physiologiques (stress oxydant) en lien avec les variations temporelles de contamination du milieu, suivi par préleveur automatique couplé au déploiement de préleveurs passifs (POCIS) placés en parallèle pour vérifier la validité de l'échantillonnage en conditions hydrodynamique et chimiques contrastées
- estimer des niveaux de contamination dans le plasma sanguin.

Co-financement :

Cette action sera menée en partenariat avec la Fédération de Pêche de Seine et Marne et a fait l'objet d'une demande de financement à Ecophyto auprès de l'AFB (demande en cours).

BLOC 5.4. Prospective sur les contaminants

Les essais de prospective réalisés en fin de phase 7 sur quelques contaminants (DEHP, DécaBDE) montrent, qu'avant d'imprégner les écosystèmes pour des temps longs, les contaminants sont déjà persistants sur de longues durées dans les sphères technique et économique. Il semble que la réglementation actuelle (essentiellement européenne) n'agisse qu'à la marge : trop tard après l'installation d'un contaminant dans les technologies et produits de consommation, avec un faible effet sur les émissions, et après la constitution de stocks dans l'environnement. Elle ne parvient qu'à viser une faible proportion des substances, au regard de l'extrême chimiodiversité de nos sociétés technologiques.



Par recours à des contaminants choisis comme indicateurs représentatifs de cette chimiodiversité, des scénarios des risques de contamination à long terme seront construits. Il s'agira également d'explorer dans quelle mesure la contamination du territoire dépend de tendances économiques et technologiques (pouvant être par exemple liées à la transition énergétique, aux mutations agricoles et industrielles), d'étudier si des fonctionnements différents du bassin (collectivités, consommateurs, ...) permettent d'éviter la répétition et la prolongation des tendances passées, et de réduire la chimiodiversité qui conduit à une contamination multiple. Une approche prospective sera ainsi couplée à la caractérisation de la contamination passée via l'enrichissement des archives sédimentaires du bassin.

5.4.1 Représentation et prospective de la pression chimique

L'action propose de développer des indicateurs permettant de hiérarchiser les substances chimiques concernant le bassin, sur la base du risque qu'elles créent des problèmes de contamination préoccupants en termes d'impacts sur les écosystèmes et de persistance, et difficilement réversibles. Cette hiérarchie sera confrontée à la contamination constatée sur le bassin. On développera aussi un indicateur global de la pression chimique, dont on fera une prospective selon divers scénarios.

Programme 2020 - 2021 :

La première phase de travail consistera à construire l'univers initial des substances chimiques, univers entendu ici dans son sens mathématique. On procèdera ainsi à un recensement des données sur les usages de produits chimiques et les contaminations pour construire un univers de départ des substances chimiques. Les nombreuses listes déjà établies de substances (réglementations, entreprises, ONG, travaux et études scientifiques), des données d'inventaire de matériaux, de produits, et de substances seront exploitées (INERIS, ECHA, ANSES, Réseau NORMAN, Materials Project,...). Cet univers très étendu sera ensuite ramené à un univers sur lequel des données de base intrinsèques nécessaires pour développer ensuite des indicateurs sur les substances sont disponibles.

Sur cette base, des indicateurs, permettant de hiérarchiser des substances d'intérêt et de caractériser la pression chimique associée, seront construits. La construction d'indicateurs de préoccupation globale pour une substance est basée notamment sur la notion d'usage/exposition, de persistance globale (système socio-technique + environnement), de danger pour le vivant, et d'irréversibilité potentielle des contaminations. Les travaux de développement d'indicateurs réalisés par l'INERIS et le CES dans le cadre du projet ANSES « ERICC » seront exploités. Le développement d'indicateurs permettant de représenter le cumul des pressions chimiques, basé sur les indicateurs par substances, seront proposés (les travaux INERIS pour la pression phytosanitaire développés dans le cadre du programme ECOPHYTEAU seront réutilisés et adaptés)

Finalement ces indicateurs seront mis en œuvre pour comparer pressions passées, actuelle et futures dans le cadre de scénarios prospectifs. Les indicateurs (de hiérarchisation de substances, puis de pression globale) seront calculés pour l'univers de substances. Des données spécifiques au territoire Seine seront alors recherchées. Si elles ne sont pas disponibles, des données par défaut seront utilisées. Pour certains types de produits, l'usage des substances est assez uniformisé (électronique, cosmétiques, détergents, pneumatiques,...) et ces données territoriales sont moins critiques. Dans d'autres cas (matériaux de construction, de voirie, ...) elles seront plus importantes. Il est probable que les informations spécifiques pour la Bassin permettent de réduire la liste des substances.

Les listes de substances hiérarchisées seront ensuite comparées à la connaissance accumulée par le programme sur la contamination des milieux et les flux vers/au sein de l'environnement. Les

convergences et différences majeures seront dans la mesure du possible interprétées, notamment pour évaluer si des nouveaux problèmes émergents de contamination potentiellement irréversible (ou difficilement réversible) doivent faire l'objet de recherches ou d'actions des pouvoirs publics.

L'indicateur de pression chimique fera l'objet d'un essai de prospective à la fois pour produire des images de scénarios tendanciels, et de scénarios « désirables » réduisant la diversité chimique et les risques. Des données prospectives sur les activités économiques (niveau France et bassin Seine), et sur les perspectives futures de l'industrie chimique seront utilisées (OCDE notamment).

5.4.2 Archives sédimentaires : reconstruire les trajectoires temporelles des contaminants

Cette action a pour objectif de comprendre les enregistrements en contaminants organiques et inorganiques 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. Cette proposition vise à continuer et amplifier l'action originale entreprise dans le PIREN-Seine depuis 2004 : retracer les activités anthropiques (y compris les changements technologiques, l'évolution réglementaire, la mise en place des traitements des eaux usées...) à partir des signaux enregistrés dans les sédiments. Plusieurs indicateurs sont proposés, avec des objectifs différents. Tout d'abord, l'analyse des contaminants organiques tels que les produits pharmaceutiques, les microplastiques et les marqueurs fécaux permettront de retracer les usages ainsi que l'évolution des réseaux d'assainissement au cours du temps. D'autres marqueurs, tels les chloroalcanes, les composés perfluorés et les phtalates, permettront principalement de retracer l'évolution des usages et de leur réglementation dans la sphère industrielle. L'étude des trajectoires, à l'échelle du bassin et du dernier siècle, des contaminants inorganiques, tel l'antimoine, et des contaminants organiques déjà bien documentés (HAP, PCB, AP, PBDE) nécessite de boucler le bilan des apports atmosphériques enregistrés par des carottes prélevées à l'amont du bassin. Dans l'objectif de ne pas se restreindre à une liste limitée de contaminants, une analyse non-ciblée sera réalisée à titre exploratoire et pourra permettre i) d'identifier des familles pertinentes mais non ciblées initialement et ii) de réaliser a posteriori une analyse rétrospective si de nouvelles problématiques/régulations apparaissaient.

Programme 2020 - 2021 :

Au préalable des analyses des contaminants, ces archives seront datées pour évaluer la fenêtre temporelle qu'elles permettent d'observer. Puis, 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 la granulométrie, le carbone organique, la caractérisation de la MO, des éléments de minéralogie, etc. Ces paramètres permettront de normaliser les teneurs observées afin de pouvoir comparer les données d'un site à l'autre, d'un temps à l'autre.

Les carottages seront prévus fin 2020, début 2021 et seront le préalable au déploiement des analyses décrites ci-dessus. L'objectif est d'enrichir notre vision amont aval du transfert des contaminants par l'acquisition de deux nouvelles carottes, en aval, avec un nouveau carottage à Bouafles (perturbé par un labour récent) et/ou rechercher un nouveau site aval, et en amont, pour meilleure représentativité du BV que celui de Chauny (très marqué par la Manufacture des Verres) ou celui de Troyes (limité à 1970).

Bien que le temps qui s'est écoulé depuis leur collecte compromette cette initiative, une évaluation de la faisabilité d'utiliser les échantillons archivés de Bouafles, Troyes, Chauny (Oise) et Pannecières sera évaluée en alternative à une nouvelle carotte Aval si celle-ci est difficile à trouver. Les analyses



des contaminants seront simultanément réalisées sur la/les carotte(s) prélevées en 2019 dans le ou les étang(s) de l'Orgeval pour la reconstruction des retombées atmosphériques (métaux et isotopie du plomb, chloroalcanes, PFAS, HAPs, organo-chlorés, phtalates et PCBs, Corg, N, ^{13}C , ^{15}N). (phtalates, HAP, PCB, Corg, N, ^{13}C , ^{15}N , plastiques, métaux et isotopie du plomb) et la nouvelle carotte Aval (pharmaceutiques, antibiotiques, stéroïdes/stanols, HAP, Phtalates, PCB, Organochlorés, ^{13}C RMN, chloroalcanes, PFAS, Corg, N, ^{13}C , ^{15}N , plastiques). Les différentes carottes feront également l'objet d'analyses non ciblées.

Co-financement :

Cette action bénéficiera du soutien de l'ANR Sedi-Plast qui est focalisée sur les Microplastiques, les sédiments et les archives sédimentaires



6. Transfert de connaissances (A. Deloménie)

Dans la continuité de la phase VII, la cellule transfert poursuivra sa mission de transfert des connaissances, tout en enrichissant son activité de la construction d'une relation directe avec les élus du bassin de la Seine, notamment dans les secteurs plus amont du bassin. Associé au transfert la bancarisation et la valorisation des données et résultats de simulation du PIREN Seine feront également l'objet d'un travail important avec pour objectif minimal la constitution d'une base de données commune, partagée et accessible aux partenaires gestionnaires et scientifiques du programme.

BLOC 6.1. La cellule de transfert des connaissances

Le transfert des connaissances générées par le programme est assuré depuis 2016 par une cellule dédiée : La cellule « transfert des connaissances ». Co-animée par l'association ARCEAU-IdF et le PIREN-Seine, celle-ci a pour mission de faciliter les échanges entre les équipes de recherche et les partenaires, et de valoriser les résultats co-construits auprès d'un public élargi.

Les productions imprimées

Pendant la phase 8 du programme, la cellule transfert continuera la production de documents papiers et numériques : fascicules, fiches thématiques et posters, tout en travaillant à l'évolution de ces formats vers des productions toujours plus adaptées aux demandes de leur public.

- **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. Comme pour la phase précédente, les thématiques des ouvrages seront à l'initiative des chercheurs, selon le degré de l'avancée des recherches qu'ils effectuent dans un domaine particulier, ou à celle des acteurs du bassin en fonction d'événements particuliers (cf. le fascicule #17 sur les effets de la crue de 2016 sur la qualité de l'eau).

- **Les fiches « 4 pages »**, productions lancées lors de la phase 7, feront l'objet d'une enquête auprès des partenaires et des acteurs du bassin pour évaluer leurs éventuelles possibilités d'évolution lors de la phase 8. La fréquence (actuellement établie à 3 publications par an), le format et l'intégration numérique de ces fiches seront interrogés afin de proposer un outil de transfert de la connaissance

non seulement adapté aux partenaires, mais également utilisable par ceux-ci en interne comme ressource et/ou comme document de valorisation. A cet égard, une proposition de publication des fiches thématiques « 2 pages », spécialement dédiées aux outils du PIREN-Seine et déclinées en une page recto-verso par outil, a été faite par la direction du programme. Comme pour la phase précédente, les thématiques des fiches seront choisies sur proposition des partenaires, en fonction de leurs attentes et besoins.

- **Les posters**, dont le premier document a été lancé sur initiative de la cellule transfert au cours de la phase 7, ont rencontré un véritable succès auprès d'un public bien plus large que le monde professionnel de l'environnement. Particulièrement sujet aux partenariats (UFBSN pour le poster sur les poissons, OCAPI pour le poster sur l'azote -à venir-), ce support permet de toucher un public issu de la société civile lors d'événements de type « Fête de la Science », ou lors d'ateliers organisés par des associations ou fédérations locales. Il peut également être utilisé comme support pédagogique. Les thématiques traitées par les posters se font à l'initiative de la cellule transfert en fonction des sujets émergeant, d'actualité et/ou facilement diffusables auprès du grand public.

Le web

L'ensemble des productions seront mises en ligne sur le site du PIREN-Seine (www.piren-seine.fr), dont l'animation et la gestion de contenus sont gérées par la cellule transfert des connaissances. La présence sur le web étant un puissant vecteur de diffusion des savoirs, un enrichissement du site en nouveaux contenus, tant sur le fond (diversification des thématiques traitées) que sur la forme (multiplication des formats pour permettre l'accessibilité à un public divers) sera opéré au fur et à mesure de la phase 8. La cellule s'appuiera également sur une banque d'images toujours plus riche (<https://media.piren-seine.fr>), et sur un investissement grandissant de la part des chercheurs.

Cet enrichissement se traduira par le développement d'éléments visuels qui permettront aux internautes de prendre connaissance des thématiques traitées par le PIREN-Seine, ainsi que de l'histoire du programme et de son fonctionnement, éléments dont les premières représentations seront présentes dans un dépliant 6 pages nommé « Qu'est-ce que le PIREN-Seine ? ». Ces éléments pourront être accompagnés de liens vers différentes pages du site web et vers d'autres sites partenaires.

Outre le maintien de la production et l'enrichissement des plateformes de diffusion déjà existantes, la cellule a pour projet de développer des documents visant à rendre accessible la compréhension des outils et méthodologies développés et utilisés au sein du PIREN-Seine. Les visuels d'information sur les outils, les axes de recherche et les sites ateliers du PIREN-Seine qui avaient été développés au début de la phase 7 (vignettes de la page d'accueil, posters des chercheurs, kakémonos), seront remis à jour lors de cette phase 8. Cette démarche s'inscrira dans la ligne prévue par le PIREN-Seine de mettre à disposition l'accès à ces outils sur le site web du programme.

Enfin, en plus de conserver la mise en ligne des rapports annuels et des supports de présentation du colloque annuel du PIREN-Seine, la cellule transfert a pour ambition de faire évoluer la diffusion des savoirs en proposant un rapport annuel condensé et accessible, qui reprendra les thématiques fortes de l'année écoulée en termes de recherche, les événements qui ont marqué la vie du programme, les sorties d'ouvrages, etc. Le bilan annuel du colloque évoluera également pour se présenter sous la forme d'un article général et de résumés de session, afin de faire émerger les informations principales, plutôt que de retranscrire les présentations et les échanges de manière exhaustive. Les PPT des présentations resteront cependant disponibles en téléchargement libre sur le site du PIREN-Seine.



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 présence de la cellule transfert sur le bassin

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.

Conformément aux activités de la cellule transfert lors de la phase 7, l'organisation des ateliers de co-réflexion du programme sera maintenue lors de la phase 8. Ces moments d'échange et de co-construction des actions de recherche entre partenaires et équipes de recherche seront organisés à un rythme de 2 à 3 par an 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.

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 8 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, dont la prise en charge logistique est assurée par la cellule, ainsi que sa participation à l'élaboration du programme, la couverture photographique de l'événement et la mise en ligne des bilans.

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 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 8 sera l'occasion pour la cellule transfert de développer une stratégie média, afin d'assurer un relai des connaissances générées par le programme auprès de médias adaptés. Les médias locaux et/ou spécialisés en sciences semblent être des relais journalistiques plus pertinents pour le transfert à bonne échelle des connaissances du PIREN-Seine. Une liste de diffusion spécifique doit ainsi être mise en place, avec des journalistes relais clairement identifiés et un processus de validation en interne des communiqués de presse à la fois efficace et réactif.

BLOC 6.2. Des données partagées et accessibles

Cette action a pour objectif de mutualiser, structurer, partager et rendre accessibles les données produites et acquises par les partenaires du PIREN Seine scientifiques et gestionnaires. Il s'agira dans un premier temps de réfléchir à la création et à la mise en place de ce produit à destination interne du programme, assurant l'interopérabilité des données, et permettant l'intégration des données haute fréquence. Le mode de diffusion à un public élargi fera l'objet d'atelier de co-réflexion. Mutualisation, structuration et diffusion de données

Les modèles développés dans le cadre du PIREN et mis en jeu dans la phase 8 vont inévitablement s'appuyer sur de nombreux jeux de données d'observation. Les données à portée historique seront tout particulièrement sollicitées et leur mutualisation présente ainsi un enjeu majeur pour la recherche interdisciplinaire au sein du PIREN.

L'objectif de cette action transversale est de structurer les jeux de données communs aux équipes et de proposer un outil web de mutualisation, d'exploration et de téléchargement des données et/ou de diffusion de webservices. Cet outil sera adossé à un catalogue de métadonnées qui fera l'objet d'une co-réflexion au sein des équipes impliquées.

Dans une première étape, il s'agira de travailler avec des jeux de données existants afin de développer et de tester l'outil, comme par exemple les données de la crue de juin 2016 ou encore les données d'observations en rivière issues notamment des Agences de l'Eau françaises (BD DoNuts de la FIRE). DoNuts fournira un cadre structurant pour l'intégration des jeux de données historiques en rivière. La deuxième étape sera d'impulser une dynamique au sein du PIREN pour permettre la mutualisation et l'intégration à l'outil de nouveaux jeux de données d'observation produits pendant la phase 8, par exemple sur le territoire de la Bassée.

Ce travail aura donc une portée transversale au sein du PIREN en permettant la mutualisation de bases de données mobilisables ensuite par les différents outils de modélisation.

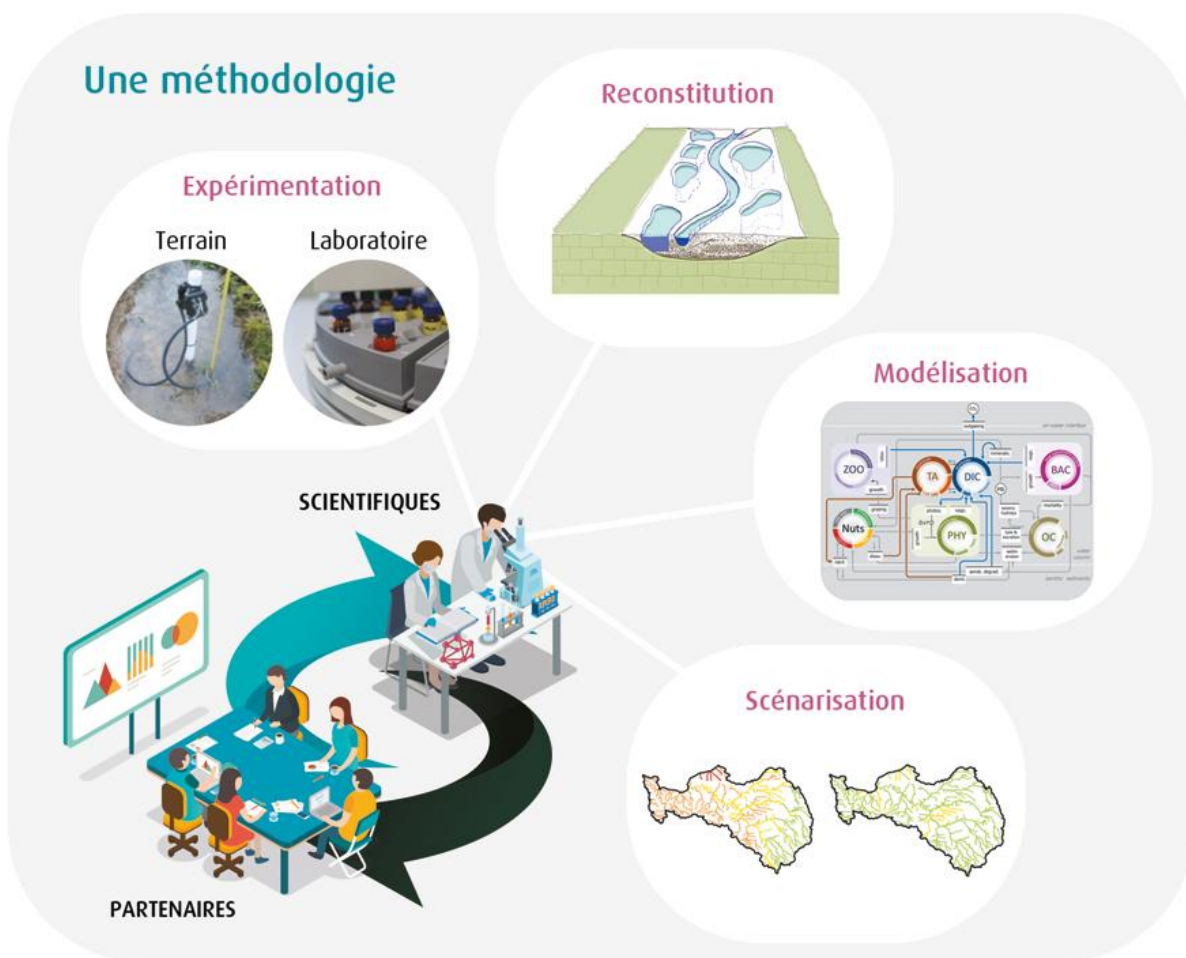
Dans un premier temps, le travail va se focaliser sur des jeux de données déjà identifiés qui seront éventuellement complétés : la base des « Températures des axes fluviaux du bassin de la Seine » (DRIEE-IDF, William Thomas), les données historiques et contemporaines des recensements et statistiques agricoles français (FIRE-METIS), les données historiques de qualité des cours d'eau (METIS, Laurence Lestel). Pour les données d'observation en rivière, il s'agira de les intégrer à la base de données DoNuts, les autres jeux de données feront l'objet de structurations spécifiques mais



néanmoins interoperables. L'ensemble sera stocké au sein de bases PostgreSQL-PostGIS sur serveurs hébergés et maintenus par le SI METIS.

En parallèle, une réflexion sur les métadonnées sera menée (quelle norme, quel format, quel stockage, etc.) et permettra d'alimenter un catalogue de métadonnées PIREN Seine interoperable notamment avec celui du réseau inter-ZA.

Dans un deuxième temps, les travaux porteront sur le développement d'interfaces web de visualisation, d'exploration et de téléchargement des données à destination des équipes de recherche et des partenaires du PIREN. Selon les licences d'utilisation des données, l'accès pourra se faire de manière restreinte.



7. Développement d'outils

Afin de répondre aux enjeux scientifiques présentés dans les cinq axes, la phase 8 s'appuiera sur le développement d'outils méthodologiques, métrologiques, et numériques. En voici un aperçu pour les avancées méthodologiques et métrologiques :

- Analyses des débats prospectifs sur l'environnement, l'urbanisme, l'agriculture et les points de controverse
- Enquêtes pour des constructions de récits (de vie, de dynamiques de socio-écosystèmes)
- Bilans quantitatifs de matières, d'éléments à l'échelle de territoires et du bassin
- Développement d'indicateurs socio-écologiques dans les plaines alluviales
- Suivi innovant de la qualité sanitaire des eaux pour la baignade et stratégie de communication associée
- Propagation de l'antibiorésistance
- Échantillonnages intégrés et conjoints des contaminants, comprenant des émergents (plastiques, nanoparticules, metformine, métaldéhyde), et des effets écotoxicologiques (POCIS, membranes, modèles biologiques encagés, biofilms)
- Devenir des macro-nutriments et des contaminants dans les interfaces
- Signature du Carbone des différents compartiments sols, eaux souterraines, gravières, cours d'eau, rivières sous différentes conditions hydrologiques

- Cartographies thermiques multi résolution depuis les drones (décimétrique) jusqu'aux images satellitaires (kilométrique)
- Mobilisation de méthodes d'analyse fréquentielle pour les données hydro-climatiques et constitution d'une base de données de réponses possibles du bassin à des phénomènes physiques globaux
- Constitution d'une base de données PIREN Seine multi-acteurs, interopérable, et intégrant les mesures haute fréquence

Ces avancées méthodologiques et métrologiques auront un pendant numérique sous forme d'outils de simulation :

- Couplages et développement de modèles pour explorer les scénarios co-construits, les récits et évaluer leurs conséquences environnementales
- Plate-forme de simulation du métabolisme C/N/P/Si à l'échelle de l'ensemble du bassin et de son réseau hydrographique STICS-CaWaQS/RIVERSTRAHLER –PyNuts
- Modélisation des transferts et stockages de pesticides sous forme de molécules types
- Développement de l'outil de simulation du transfert des micro-polluants par familles d'espèces
- RIVE Unifié incluant, en sus des développements de la phase VII sur les gaz dissous, la spéciation du carbone organique dissous
- Géochimie des carbonates et contribution des eaux souterraines aux bilans de gaz à effet de serre (couplage CaWaQS-CHESS)
- Assimilation de données dans ProSe et connexion avec la chaîne de traitement des eaux amont
- Transferts d'énergie dans l'ensemble du bassin ; intégration explicite de la végétation
- Généralisation de la méthodologie d'emboîtement de modèles pour gérer les changements d'échelle régional <-> local, régional <-> continental

Modélisation des plaines alluviales de la Bassée et de la métropole du Grand Paris, comprenant les écoulements de surface et les eaux souterraines en contexte régional, et les fonctionnements géochimique et écologique du milieu.

8. 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.
- Ardo, S.G., Nélieu, 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.
- 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 Bassée 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.
- 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.
- Boggon, 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., 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.
- 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.
- 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., 2014b. 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.
- 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.
- Devaux, J., Heller, A., 2018. L'Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (EFES) -- Les milieux humides et aquatiques continentaux.
- 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.
- 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. Épidémiologique Hebdomadaire* 8–9, 129–175.
- 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., 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., Gayet, 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.
- Gaillardet, J., Braud, I., Hankard, F., Anquetin, S., Bour, O., Dorfliger, N., de Dreuz, J.R., Galle, S., Galy, C., Gogo, S., Gourcy, L., Habets, F., Laggoun, F., Longuevergne, L., Borgne, T. Le, Naaim-Bouvét, 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., Fauchoux, M., Filizola, N., Flammarion, P., Floury, P., Fovet, O., Fournier, M., Francez, A.J., Gandois, L., Gascuel, C., Gayet, 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, 180067.
- 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.
- 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.
- Jost, A., Wang, S., Labarthe, L., Flipo, N., 2017. Impacts hydrodynamiques des gravières dans la plaine alluviale de la {B}assée.
- 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., 2016b. 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. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- 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, 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.
- 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.
- 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.
- 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., Naw, 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, 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.
- Quattara, 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.
- 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.
- Rivière, A., Flipo, N., Ansart, P., Baudin, A., Marlot, L., 2018. Revue des données de température du bassin des Avenelles.
- 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.
- 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.
- Tallec, G., Ansart, P., Guérin, A., Delaigue, O., Blanchouin, A., 2015. Observatoire Oracle; Irstea.

Taltec, 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.

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.

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.



9. Annexe Financière

9.1 Dépenses prévisionnelles détaillées

9.2 Recettes prévisionnelles pluri-annuelles

Le budget prévisionnel de la phase huit est en forte croissance par rapport au budget de la phase VII (partie travaux de recherche et cellule transfert). Cette croissance s'explique par le fruit du travail de la direction et de la cellule transfert qui a permis de convaincre trois nouveaux partenaires (la métropole du Grand Paris, le Syndicat Départemental des eaux de l'Aube, et l'entreprise CLIMESPACE) de participer aux activités du programme. Le budget prévisionnel est établi au plus prêt des réponses reçues au 26/7/2019. Ce budget élargi permet de fournir au programme des postes supports dédiés à:

- la gestion administrative et financière du programme durant toute la durée de la phase
- la gestion, la coordination et l'analyse des nombreuses campagnes de terrain durant 3 ans
- le développement des outils numériques communs durant 3 ans
- la bancarisation, la gestion des données, et leur interfaçage avec des systèmes d'interrogation et de visualisation en ligne durant 3 ans



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 8 (2020 – 2023), 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 8



Les territoires au prisme du système agro-alimentaire



Le bassin soumis aux extrêmes hydro-climatiques



Milieus aquatiques : risques hydrologiques et biodiversité



Métropole 2024 : Ambitions et enjeux



Dynamique des contaminants, des processus au métabolisme

Les cellules dédiées



Transfert des connaissances



Modèles et données