



PIREN
Seine

Fascicule #27



35 ans d'interdisciplinarité dans le bassin de la Seine

Sous la direction de Alexandre Deloménie et François Mercier

35 ans d'interdisciplinarité dans le bassin de la Seine

Ouvrage rédigé par :
Alexandre Deloménie^[1] et François Mercier^[1]

Avec la participation de :

Nicolas Flipo^[2], Jean-Marie Mouche^[3], Josette Garnier^[3], Gilles Billen^[3], Hélène Blanchoud^[3], Sabine Barles^[4], Fabien Esculier^[3,4], Johnny Gasperi^[5], Agnès Rivière^[2], Nicolas Gallois^[2], Pascal Viennot^[2], Julien Tournebize^[6], Evelyne Tales^[6], Jérôme Belliard^[6], Laurence Lestel^[3], Catherine Carré^[7], Xavier Poux^[8], Irina Severin^[1], Aurélie Goutte^[3], Marc Bonnard^[9], Thomas Thiebault^[3], Marie Silvestre^[3], Anice Yari^[10]

[1] ARCEAU-IdF, Cellule Transfert du PIREN-Seine - [2] Mines-ParisTech PSL, Centre de Géosciences - [3] Sorbonne Université, CNRS, UMR 7619 Metis
[4] Université Paris 1 Panthéon Sorbonne – Géographie-cités - [5] UPEC, LEESU - [6] Irstea - [7] Université Paris 1 Panthéon Sorbonne - LADYSS - [8] ASCA
[9] Université de Reims Champagne-Ardenne / INERIS / ULH, UMR SEBIO - [10] PIREN-Seine

Le socio-hydrosystème Seine en bref



Le bassin de la Seine s'étend sur plus de 76 000 km², dont 65 000 km² en amont de son estuaire, l'exutoire du bassin étant situé à Poses. La Seine prend sa source sur le plateau de Langres, en Côte-d'Or, avant de se jeter dans la Manche, entre le Havre et Honfleur. Représentatif de l'Anthropocène, le bassin versant de la Seine est fortement influencé par la société humaine. Depuis plusieurs siècles, il subit et continue de subir une forte pression anthropique, en raison de son industrie et de l'agriculture liées notamment au développement de l'agglomération parisienne, creuset économique et social de la France.

Entre 1901 et 2016, la densité de population de la région Île-de-France, et plus particulièrement de l'agglomération parisienne, n'a cessé de croître et de s'étendre spatialement (Figure A). Dans cette région, elle varie entre 1 000 et 5 000 habitants par km² dans les zones urbaines, alors que la densité moyenne est de 250 habitants par km² pour l'ensemble du bassin, et est inférieure à 20 habitants par km² dans les zones en amont. Actuellement, environ 18 millions de personnes, soit plus du quart de la population française, y habitent.

Cette évolution de la densité de la population se traduit par une pression urbaine sur le réseau hydrographique qui augmente d'amont en aval, pour culminer à l'aval de l'agglomération parisienne. Elle se traduit notamment par

des modifications des niveaux d'oxygène, des teneurs en matières organiques, en nitrites, ainsi qu'en bactéries fécales (importantes lors d'événements orageux). À ces pressions urbaines s'ajoutent des pressions agricoles qui se manifestent par des pollutions diffuses, plus difficiles à contrôler que des pollutions ponctuelles en aval de points de rejet. En effet, après la Seconde Guerre mondiale, l'agriculture française a subi une transformation profonde sous l'impulsion de grandes politiques telles que le plan Monnet (1945), le plan Marshall (1947), et la Politique agricole commune (1962). Ces décisions avaient alors pour but de favoriser des exploitations à la fois plus grandes et plus productives pour répondre à la demande parisienne de plus en plus forte, mais également aux demandes européenne et mondiale.

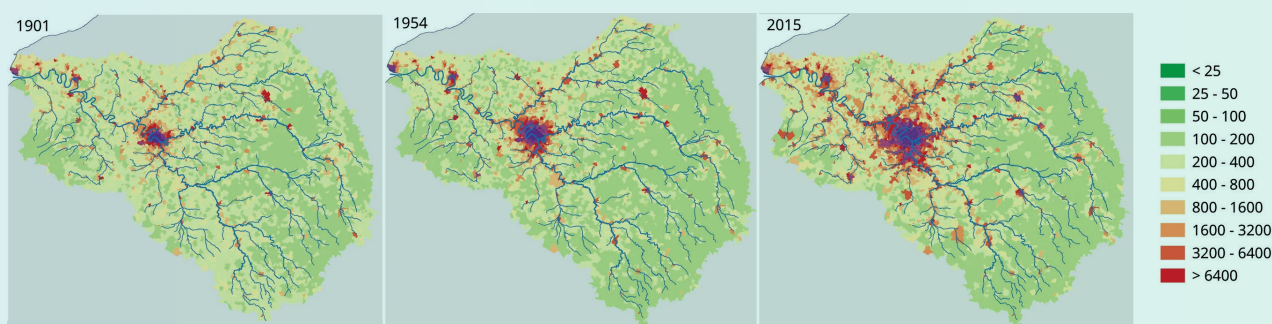


Figure A : Évolution de la densité de population du bassin de la Seine (en hab/km²) en 1901, 1954 et 2015 (d'après Flipo et al., 2020).

Ces politiques se traduisent aujourd’hui par une occupation du sol du bassin de la Seine très contrastée avec près de 8 % de sols artificialisés, principalement avec l’agglomération parisienne et les métropoles de Rouen et du Havre (Figure B). Soixante pour cent de la surface du bassin est, quant à elle, dédiée à l’agriculture, dont la très grande majorité

est occupée par des terres arables. Cette prédominance de grandes cultures, couplée à un usage généralisé des pesticides et des engrais azotés, a largement contribué à la dégradation de nombreuses masses d’eau souterraines et de surface. Une pression qui risque de s’accroître avec le changement climatique et la raréfaction de la ressource en eau.

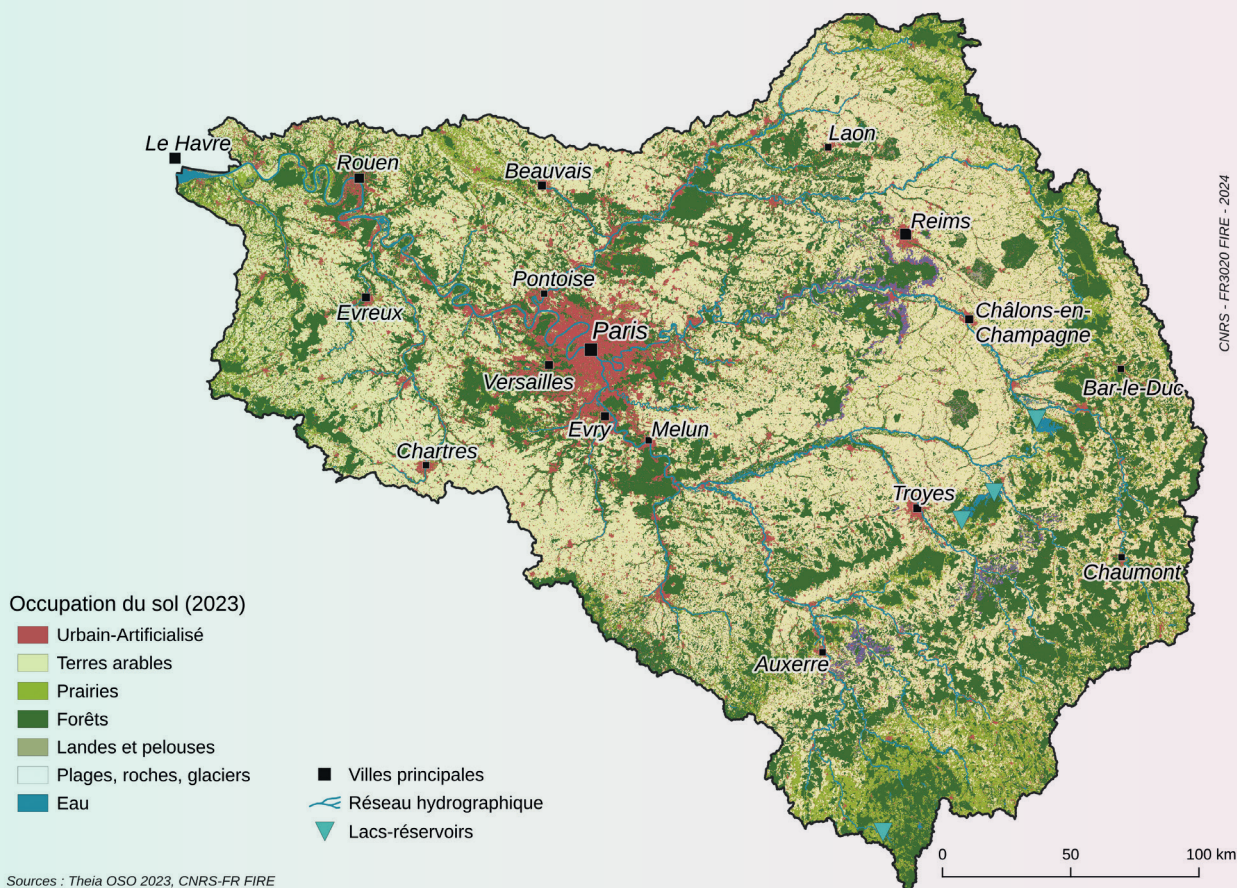


Figure B : Occupation du sol du bassin versant de la Seine (d’après Théia OSO, 2023).

Type de sol	Occupation du sol (en %)
Terres arables	45,7
Urbain-Artificialisé	8
Prairies	13,5
Cultures permanentes	1
Forêts	30
Landes et pelouses	0,5
Plages, roches, glaciers	0,04
Surfaces en eau	0,8
Serres	0,01

Tableau : Statistiques de l’occupation du sol sur le bassin de la Seine (données Theia OSO 2023).

L'hydrogéologie du bassin de la Seine en bref

Le bassin versant de la Seine coiffe une grande partie du bassin sédimentaire de Paris, ce dernier étant l'un des plus grands réservoirs d'eau souterraine d'Europe. De ce fait, les ressources en eau dans le bassin de la Seine y sont très importantes. Le bassin de Paris est composé d'un empilement de roches calcaires, argileuses et sableuses qui ont été déposées lors des ères secondaires, tertiaires et quaternaires (Figure C). Les nombreuses nappes phréatiques et alluviales qui le composent contribuent significativement à l'alimentation des cours d'eau et des rivières suivant le pendage naturel du bassin du sud-est vers le nord-ouest, son relief étant peu marqué avec une altitude moyenne inférieure à 300 m. L'ensemble de ces rivières et cours d'eau représente un linéaire de 27 500 km.

La pluviométrie moyenne du bassin (prise sur la période 2003-2020) est d'environ 760 mm/an, mais tous ses territoires ne sont pas soumis aux mêmes quantités de précipitations. En effet, son centre (Beauce, Gâtinais, ...) ne reçoit que 550 mm/an en moyenne, contre plus de 1200 mm/an pour les côtes normandes. De cette eau

apportée par les précipitations, 70 % repartent dans l'atmosphère par évapotranspiration, et 17 % rechargent les nappes, qui en retour contribuent aux deux tiers du débit de la Seine à l'entrée de son estuaire à Poses. Par ailleurs, la saisonnalité de l'évapotranspiration est marquée entre l'hiver et l'été, jouant également sur le débit des rivières selon les saisons.

À titre d'exemple, le débit moyen de la Seine à la station de Paris, Pont Austerlitz est de 310 m³/s, avec des extrêmes hydrologiques marqués : d'un minimum de 20 m³/s pour la sécheresse historique de 1921 à un maximum de 2 600 m³/s pour la crue historique de 1910.

Cette variabilité spatiotemporelle des débits (Figure D) est aujourd'hui, en grande partie, compensée par quatre grands lacs-réservoirs disposés à l'amont du bassin. Ces « Grands Lacs de Seine » peuvent stocker 840 millions de m³ d'eau et sont gérés par l'EPTB Seine Grands Lacs. Construits durant la seconde moitié du XX^e siècle, ils ont pour but de réguler le débit de la Seine, en le soutenant lors des étiages et en écrétant les crues. Ce dispositif permet également de maintenir un niveau d'eau plus ou moins constant nécessaire aux activités humaines.

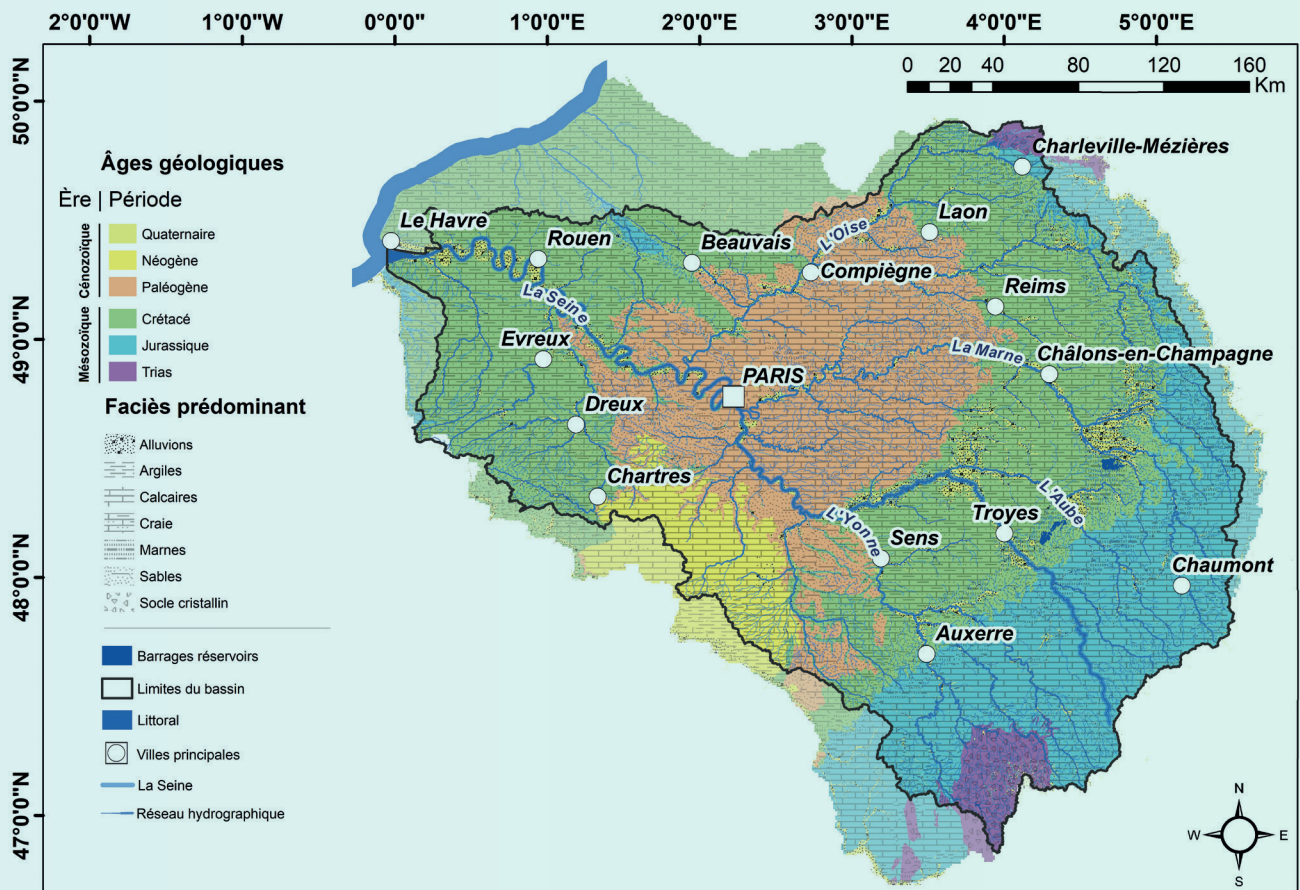


Figure C : Géologie à l'affleurement du bassin de la Seine et réseau hydrographique principal.



Figure D : Réseau hydrographique du bassin de la Seine et principaux sous-bassins versants.

Numéro sur la carte	Station	Nom du cours d'eau	Débit moyen (2007-2023) en m ³ s ⁻¹
1	Bazoches-lès-Bray	Seine	70,9
2	Saint-Fargeau	Seine	199,1
3	Austerlitz	Seine	307,9
4	Vernon	Seine	462,5
5	Creil	Oise	101,4
6	Créteil	Marne	100,2
7	Arcis-sur-Aube	Aube	32,5
8	Pont-sur-Yonne	Yonne	88,7
9	Épisy	Loing	19
10	Ballancourt	Essonne	8
11	Morsang	Orge	3,9
12	Louviers	Eure	21,2

Tableau : Débits moyens sur la période 2007-2023 aux différentes stations hydrologiques de la Seine et celle à l'aval des sous-bassins du bassin de la Seine (d'après les données Hydroportail / EauFrance).

Les pratiques anthropiques influencent fortement le devenir de la ressource en eau souterraine. Outre les pollutions liées aux activités humaines, 1,15 milliards de m³ sont prélevés chaque année dans les aquifères, ce qui représente un tiers des prélèvements totaux pour les usages anthropiques (alimentation en eau potable, secteur industriel et agriculture). Les deux autres tiers correspondent aux prélèvements qui ont lieu directement en rivière.

La gestion de la ressource en eau se trouve actuellement confrontée à des tensions significatives. Cette pression est appelée à s'intensifier, d'une part, en raison de la croissance démographique au sein du bassin, et d'autre part, sous l'effet des bouleversements climatiques affectant le bassin de la Seine. Face à ces défis croissants, il devient impératif d'interroger nos stratégies collectives afin d'anticiper ces évolutions, d'atténuer les impacts du changement climatique et, *in fine*, d'assurer une adaptation durable à ces transformations.



Sommaire



INTRODUCTION

10

CHAPITRE 1 : Le bassin, ses tissus agricoles et urbains

16

Les flux de nutriments, de la circularité à la linéarité	18
Les pesticides, une pression qui se poursuit	20
Le métabolisme territorial	22

CHAPITRE 2 : Les contaminants du bassin

24

L'histoire sédimentaire de la contamination	26
Les micropolluants, entre héritages et usages actuels	28
Des nouvelles pollutions : les contaminants émergents	30
Étudier le biote pour évaluer les contaminations	32

CHAPITRE 3 : Comprendre le fonctionnement des milieux

34

L'hydrogéologie du bassin : comprendre l'évolution des ressources en eaux	36
La biogéochimie de l'axe fluvial	38
Les zones humides : de l'hydraulique douce pour la gestion de l'eau	40

CHAPITRE 4 : Les usages de l'eau, des trajectoires passées, présentes et futures

42

Les peuplements de poissons	44
La modification de la géomorphologie	46
La construction de la qualité chimique de l'eau	48

CHAPITRE 5 : Des outils pour l'aide à la gestion

50

La chaîne de modélisation du continuum Homme-Terre-Mer	52
La prospective et les futurs du bassin	54
Données et science ouverte	58

CONCLUSION

60

Références

64

Glossaire

67

Acronymes

70



Introduction

L'eau est une ressource essentielle pour les sociétés humaines, que ce soit pour sa consommation directe ou pour son rôle crucial dans de nombreux domaines d'activité, tels que l'agriculture, l'industrie, l'hygiène ou la préservation de l'environnement. Le bassin de la Seine représente 12% du territoire national, accueille le quart de la population de la France, un tiers de sa production agricole et industrielle, et plus de la moitié de son trafic fluvial. La connaissance des mécanismes liés à l'eau et ses usages relève donc d'un enjeu majeur. C'est pourquoi il existe depuis 35 ans un programme de recherche scientifique interdisciplinaire de grande ampleur, soutenu par le CNRS, plusieurs universités et écoles de premier plan et par les principaux gestionnaires de l'eau du bassin : le PIREN-Seine.

Depuis plus de 3 décennies, le PIREN-Seine réunit ainsi des dizaines d'équipes de recherche aux domaines d'expertise divers et des opérationnels de la gestion de l'eau autour d'enjeux environnementaux essentiels : l'agriculture, la qualité de l'eau, la ressource hydrique, l'analyse des compartiments et des flux, la biodiversité, les contaminants, les usages de l'eau, l'impact du changement climatique. Fort d'une expertise construite sur le long terme et sur la relation de confiance et de co-réflexion entre les partenaires institutionnels et les scientifiques, le programme est à l'origine de nombreux modèles numériques, articles scientifiques, rapports d'activité et ouvrages qui font aujourd'hui référence à un niveau international.

Le PIREN-Seine regroupe actuellement plus de 25 équipes de recherche de toute la France, dans des domaines aussi divers que l'hydrologie, l'hydrochimie, l'hydrogéologie, l'hydroécologie, la géochimie, la biogéochimie, l'agronomie,

la microbiologie, l'écotoxicologie, la géographie physique, la modélisation numérique, la géographie humaine et l'histoire. Mais c'est aussi un partenariat avec d'autres structures scientifiques essentielles à la construction d'une vision globale du bassin Seine-Normandie. Avec le GIP Seine-Aval et l'Observatoire urbain OPUR, les trois programmes forment la Zone Atelier Seine, un ensemble aux compétences et aux territoires d'analyse complémentaires, qui mettent en commun certaines de leurs ressources pour établir un réseau de suivi cohérent des indicateurs de l'eau, et une approche scientifique riche et pertinente tant à l'échelon local qu'au niveau du bassin.

Analyser l'environnement du bassin de la Seine comme un anthropoécosystème vaste et complexe est un défi qui nécessite un investissement constant de la part d'équipes de recherche aux compétences diverses, et implique de construire une vision globale et intégrée sans négliger pour autant l'analyse fine des processus microscopiques d'une

importance capitale. De l'étude des micropolluants, des microorganismes et des concentrations au nanogramme par litre, aux dynamiques d'occupation urbaine des villes et aux gigantesques flux alimentaires chiffrés en millions de tonnes, le PIREN-Seine poursuit l'objectif de présenter une connaissance toujours plus approfondie du fonctionnement du bassin, et des outils mobilisables pour les gestionnaires de l'eau et de l'environnement.

La construction et l'enrichissement continu de modèles, marque de fabrique du programme depuis ses débuts en 1989, combinés à un suivi expérimental de terrain sur des sites ateliers répartis sur des territoires clefs, a permis d'aboutir à une compréhension précise du fonctionnement du bassin de la Seine. Les chaînes de modélisation, renforcées par une analyse des données historiques d'un bassin remarquablement instrumenté et suivi, offrent aujourd'hui une connaissance, unique au monde, des mécanismes macro- et microscopiques liés à l'eau dans un bassin versant de cette taille.

Cette expertise et ce travail de longue haleine permettent aujourd'hui de proposer des exercices prospectifs sur les futurs possibles du bassin de la Seine en construisant des scénarios robustes, prenant en compte un très grand nombre de paramètres tels que l'occupation des sols, les intrants agricoles, la biogéochimie, la variation des débits, les interactions nappe-rivière, l'impact sur le biote, etc. Autant d'éléments qui demeureraient difficilement mobilisables et articulables les uns par rapport aux autres sans la dynamique de temps long multi- et interdisciplinaire du PIREN-Seine.

Construit dans une démarche de diffusion large des savoirs scientifiques, le PIREN-Seine met gratuitement à disposition du public ses rapports d'activité depuis ses origines. Au tournant du millénaire, le programme a diversifié ses productions afin de toucher un plus large public, et d'inscrire sa contribution dans une volonté d'échange avec une société civile de plus en plus informée sur les questions environnementales. Ainsi, chaque année, un colloque de restitution gratuit et ouvert est organisé, dans lequel les scientifiques viennent présenter l'avancée de leurs travaux. Depuis 2006, des fascicules thématiques sont édités par le programme pour résumer l'ensemble des connaissances dans un domaine particulier, de l'hydrogéologie du bassin à son système agricole en passant par la micropollution et le

peuplement de poissons. Enfin, depuis 2016, le PIREN-Seine s'est doté d'une cellule *Transfert des connaissances* pour animer son site web, poursuivre l'édition des fascicules, produire des contenus plus courts et mobilisables tels que les fiches « 4 pages », ou des documents grand public comme les posters. Fidèle à sa démarche initiale, toutes ces productions sont disponibles gratuitement et en accès libre sur le site du programme.

A la fin 2024, le programme a commencé sa 9^e phase pluriannuelle et a achevé sa 35^e année d'existence. Une longévité exceptionnelle pour un programme de cette nature, à la fois souple dans son organisation et réactif vis-à-vis des attentes des acteurs du bassin. Pour les 35 ans du programme, les scientifiques se sont lancés un défi d'importance : produire un coffret de fascicules pour présenter l'état des connaissances sur le bassin. Le fascicule entre vos mains est une version augmentée de « 30 ans de recherche sur le bassin de la Seine ». Il intègre les derniers résultats et thématiques de recherche de la phase 8 du PIREN-Seine. Plusieurs encarts y sont disséminés au fil des thématiques, marqueurs des engagements du PIREN-Seine sur ses fondamentaux de modélisation, de diffusion des connaissances et d'ancrage dans les territoires. Des encarts « On modélise ! », « On synthétise ! » et « Focus sur » permettront ainsi au lecteur de découvrir les outils, savoirs et expérimentations qui sont développés au sein du programme.



L'interdisciplinarité

- Cœur historique (depuis 1989)
- A partir de 1995
- A partir de 2005

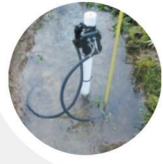


Une méthodologie

Expérimentation

Terrain

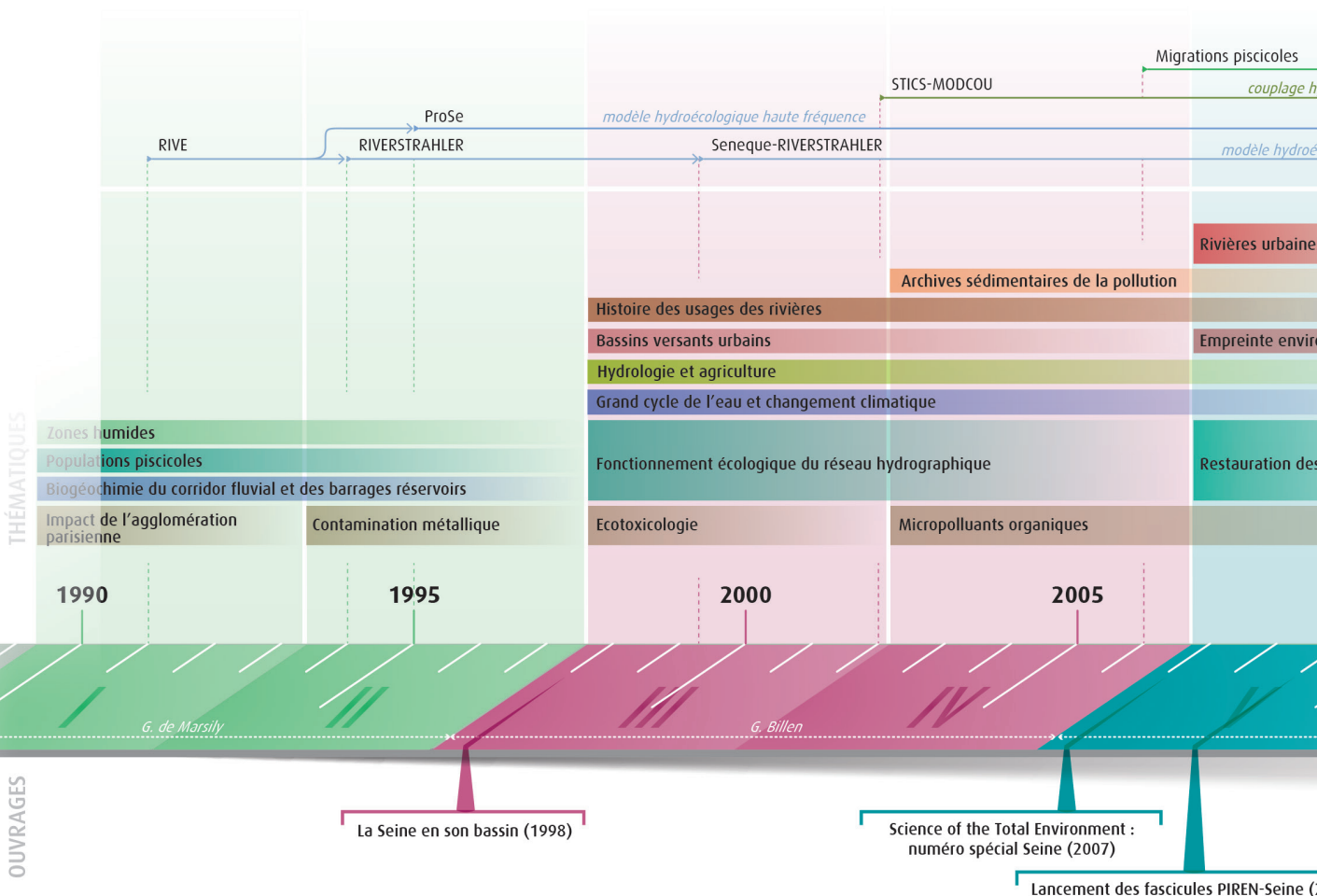
Laboratoire

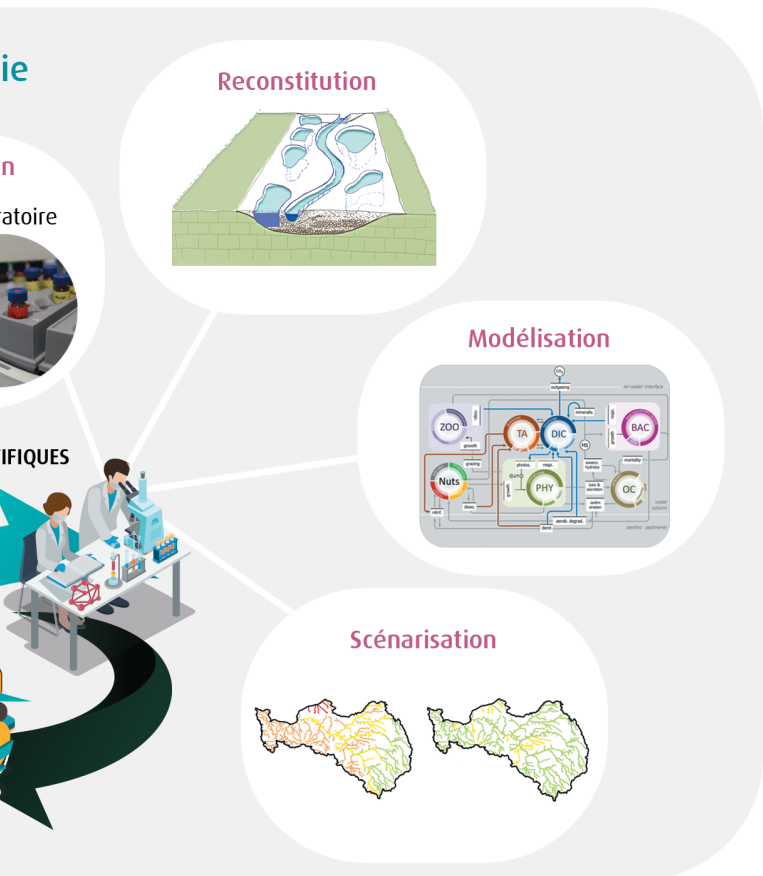


SCIENTIFIQUES

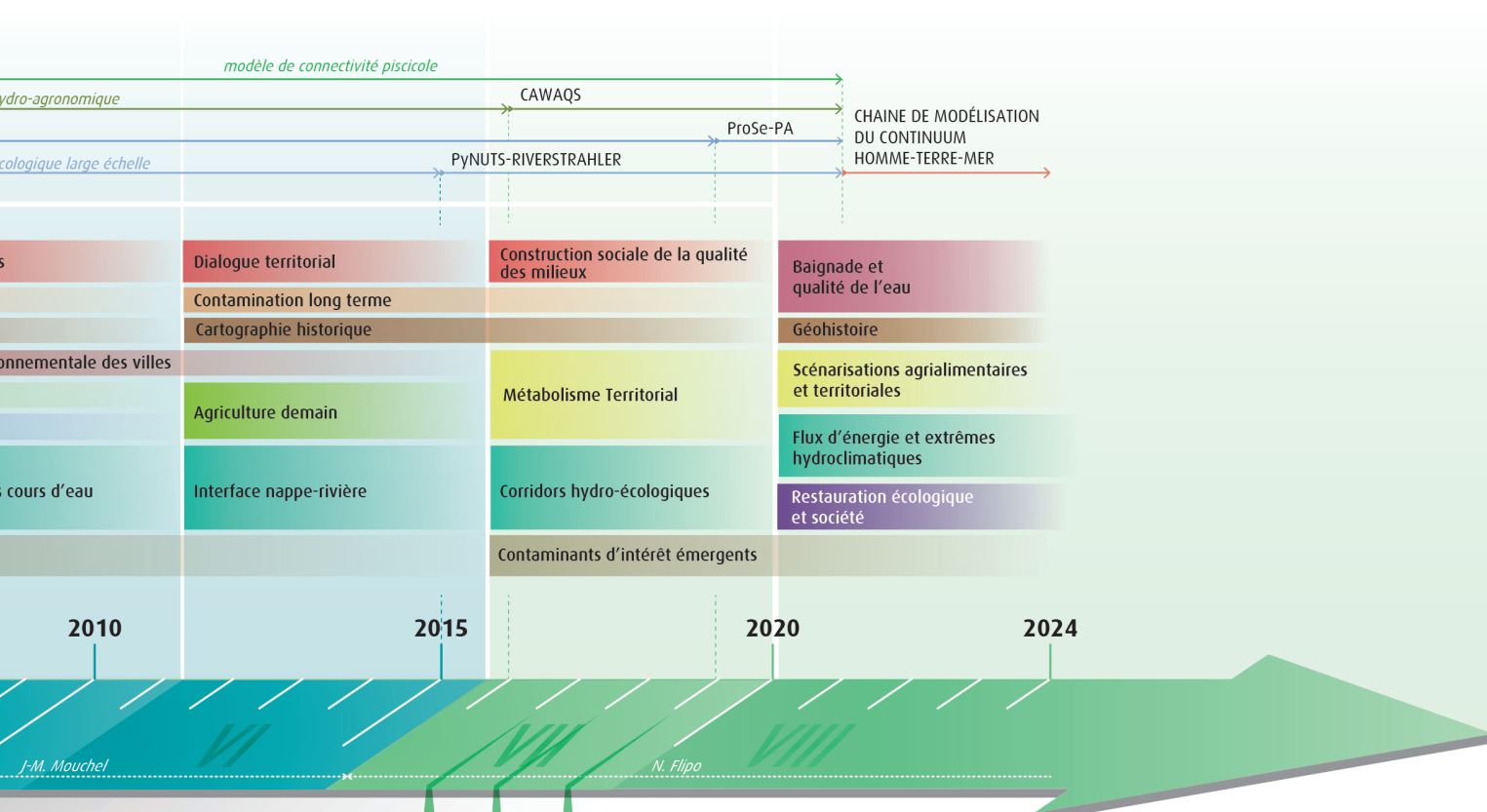


PARTENAIRES





La mise à disposition des résultats



Fiches PIREN-Seine et nouveaux fascicules (2017)

Handbook of Environmental Chemistry "The Seine River Basin" (2019)

Environmental Science and Pollution Research (2018)

En 2025, le PIREN-Seine, ce sera **plus de 100 chercheurs et doctorants** :



Avec 25 équipes de recherche :

- **CECI** (UMR 5318 : Climat, Environnement, Couplages et Incertitudes)
- **Centre de Géosciences** (UR MINES Paris – PSL)
- **CEREGE** (Centre de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement, UMR 7330)
- **EPOC** (Environnements et Paléoenvironnement Océaniques, UMR 5805)
- **ESE** (Laboratoire Écologie, Systématique et Évolution, UMR 8079)
- **GEOPS** (Laboratoire Géosciences Paris-Saclay, UMR 8148)
- **Géotéca** (Géomatique, télédétection, cartographie, Université Paris-Cité)
- **HYCAR** (Hydrosystèmes continentaux anthropisés : ressource, risques et restauration, UR INRAE)
- **IMPMC** (Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie, UMR 7590)
- **INERIS** (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques)
- **IPGP** (Institut de physique du globe de Paris, UMR 7154)
- **IPR** (Institut Paris Région)
- **ISIGE** (Institut Supérieur d'Ingénierie et de Gestion de l'Environnement - Mines Paris PSL)
- **LADYSS** (Laboratoire Dynamiques sociales et recomposition des espaces, UMR 7533)
- **LAVUE** (Laboratoire Architecture Ville Urbanisme Environnement)
- **LEE** (Laboratoire eau et environnement, Université Gustave Eiffel)
- **LEESU** (Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains, UMR MA 102)
- **LEM** (Laboratoire Ecologie microbienne, UMR 5557)
- **LGP** (Laboratoire de Géographie Physique, Environnements quaternaires et actuels, UMR 8591)
- **LISIS** (Laboratoire Interdisciplinaire Sciences Innovations Sociétés, UR INRAE)
- **LSCE** (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, UMR 8212)
- **M2C** (Morphodynamique Continentale et Côtière, UMR 6143)
- **METIS** (Milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols, UMR 7619)
- **SADAPT** (Science Action Développement - Activités Produits Territoires, UMR 1048)
- **SEBIO** (Stress Environnementaux et BIOSurveillance des milieux aquatiques, UMR-I 02)



Soutenues par **12 universités et écoles d'ingénieurs** :

- Sorbonne Université
- Université de Bordeaux
- Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
- Université Paris Diderot
- Université Paris Cité
- Université Paris-Est-Créteil-Val-de-Marne
- Université de Reims Champagne-Ardenne
- Université de Rouen Normandie
- MINES Paris - PSL
- École des Ponts ParisTech
- Université Claude Bernard
- Université Gustave Eiffel

Ainsi que par **4 instituts nationaux** : le CNRS, le CEA, INRAE et INERIS.

Le PIREN-Seine, c'est également **2 cellules dédiées à des actions spécifiques** :

- La cellule « **Données** », animée par l'UMR METIS
- La cellule « **Transfert des connaissances** », animée par ARCEAU-IdF

Le PIREN-Seine, l'observatoire OPUR et le GIP Seine-Aval composent la Zone Atelier Seine de l'INEE (Institut écologie et environnement du CNRS). Celle-ci fait partie du réseau national des Zones Ateliers du CNRS, qui se répartissent notamment sur l'ensemble des grands bassins hydrographiques de France.





CHAPITRE 1



Le bassin, ses tissus agricoles et urbains

Le bassin de la Seine est un territoire particulièrement anthropisé, tant par l'occupation urbaine des sols que par les exploitations agricoles de grande envergure, principalement céréalières, qui en composent la majeure partie. Ces usages entraînent un grand nombre de conséquences sur l'eau et l'environnement, et nécessitent une recherche approfondie pour trouver des solutions aux défis de la gestion qualitative et quantitative de l'eau, et de la préservation de la biodiversité.

Si la société humaine est aujourd'hui très segmentée entre les zones rurales et les zones urbaines, l'étude de l'environnement sur un territoire tel que le bassin de la Seine nécessite de sortir de cette vision compartimentée du système, afin d'y voir les dynamiques, les flux de matières

et les trajectoires socio-historiques de manière globale. C'est la démarche adoptée par le PIREN-Seine depuis 35 ans, qui relie les tissus urbains et agricoles du bassin pour comprendre le fonctionnement de l'anthropoécosystème Seine, de ses processus physico-chimiques les plus fins à ses mécanismes macroscopiques les plus vastes.

De l'utilisation des pesticides et des engrais de synthèse au choix de consommation alimentaire des populations en passant par la gestion des flux de nutriments et des déchets, l'étude du métabolisme du territoire, de son modèle agrolimentaire et de ses conséquences sur l'eau et les milieux aquatiques est l'un des piliers de la recherche scientifique au PIREN-Seine.

Les flux de nutriments, de la circularité à la linéarité

L'un des grands défis civilisationnels actuels relève de la capacité de la société à assurer de manière durable les cycles et les transferts des nutriments, dont certains sont en quantité limitée et pourtant essentiels pour l'alimentation. La centralisation de la population du bassin de la Seine vers les grands centres urbains, qui s'est effectuée pendant les deux derniers siècles et qui s'est accélérée lors des 50 dernières années, a fortement modifié le système agroalimentaire. L'agriculture s'est ouverte et spécialisée, et la gestion des nutriments est passée d'un processus circulaire de retour à la terre à un système linéaire de production industrielle et de rejet des déchets et du surplus vers le « tout à la rivière », dont les flux sont aujourd'hui bien documentés par les équipes du PIREN-Seine. Si le recours aux engrais de synthèse a ainsi contribué à augmenter les rendements agricoles, il a également entraîné son lot de conséquences en matière de pollution environnementale.

Les principaux nutriments dont les plantes cultivées ont besoin sont l'azote (N), le phosphore (P) et le carbone (C), non seulement en quantité suffisante, mais selon des rapports précis. L'industrialisation de l'agriculture dans les années 1960 a provoqué une explosion de l'utilisation des engrais azotés (N) et phosphorés (P), dont le surplus s'est retrouvé acheminé vers les masses d'eau, à la fois phréatiques et de surface (N) ou stocké dans les sols (P). Ces surplus, combinés aux rejets d'eaux usées en aval des agglomérations, ont eu de nombreux effets dévastateurs sur les eaux de surface, provoquant des épisodes

d'eutrophisation, de déficits en oxygène sévères et de forte mortalité piscicole.

Depuis le début des années 1990, les chercheurs du PIREN-Seine travaillent en collaboration étroite avec le Syndicat interdépartemental d'assainissement de l'agglomération parisienne (SIAAP) pour aider à quantifier ces flux et à traiter les pollutions ponctuelles dans les stations d'épuration. Depuis la mise en place des processus de traitement de l'azote et du phosphore, la situation s'est grandement améliorée sur le bassin de la Seine. Mais la pollution diffuse continue d'exercer une pression constante sur le milieu par le recours aux engrais azotés. Ces pratiques alimentent la pollution des nappes par les nitrates, dont le seuil de potabilité est fixé à 50 mg/l par la DCE et l'OMS. Enfin, le risque de remobilisation du phosphore stocké dans les sols depuis son utilisation massive dans les années 1970 demeure.

Outre cette pollution directe des milieux aquatiques, la dépendance de l'agriculture aux fertilisants (et aux pesticides associés) interroge sur la soutenabilité à long terme du système agroalimentaire. Le phosphore, ressource non renouvelable, existe en quantité limitée, et est actuellement extrait de mines, principalement marocaines, qui s'épuiseront dans les prochaines décennies. La fabrication d'engrais azotés à partir du diazote atmosphérique est un processus coûteux en énergie, fortement dépendant des hydrocarbures fossiles, qui

On modélise !

La recherche sur les nutriments agricoles s'appuie au PIREN-Seine sur de nombreux modèles, souvent conçus au sein même du programme. A cet égard, le modèle biogéochimique RIVE, développé à la fin des années 1980, a servi de base à d'autres modèles simulant les flux biogéochimiques dans le bassin, tel que le modèle Riverstrahler, applicable à grande échelle et simulant les flux sur toute la façade européenne atlantique.

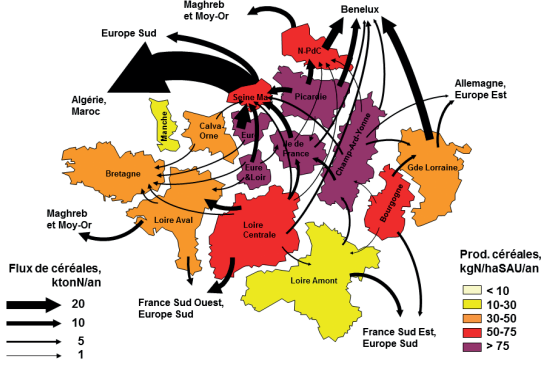
Pour représenter les flux de nutriments et leurs interconnexions dans le système agro-alimentaire, l'approche GRAFS est un outil de synthèse très utile. Développé au sein du programme, il peut être appliqué à diverses échelles, de la parcelle agricole aux échanges internationaux et permet d'explorer différents scénarios.

Le PIREN-Seine s'est investi dans le couplage de modèles préexistants pour créer des chaînes de modélisation de plus en plus abouties. Ainsi, le couplage du modèle STICS d'INRAE et du modèle MODCOU, aujourd'hui CaWaQS développé par MINES Paris - PSL, permet de simuler le transfert des nitrates des parcelles agricoles aux principaux aquifères du bassin de la Seine. Les flux ainsi calculés peuvent également être utilisés en données d'entrée au modèle Riverstrahler pour en calculer le devenir dans les zones riveraines et le réseau hydrographique. La chaîne de modélisation du PIREN-Seine est *in fine* couplée au modèle marin ECO-MARS 3D de l'IFREMER pour déterminer les impacts sur la zone côtière.

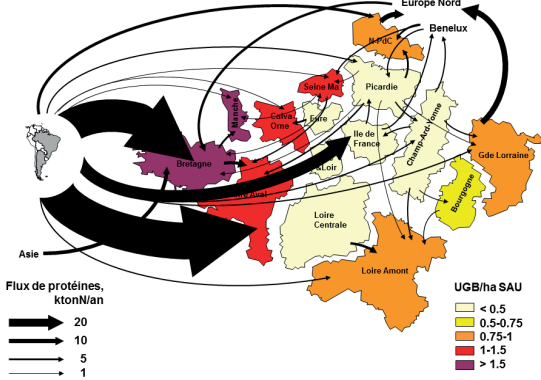
Pour nourrir cette chaîne de modèles, les chercheurs utilisent la base ARSeiNE d'INRAE, une base de données décrivant l'évolution des systèmes agricoles dominants sur les 50 dernières années, à l'échelle du bassin hydrographique Seine-Normandie.

Le dernier chapitre de cet ouvrage aborde plus dans le détail la chaîne de modélisation le long du continuum Homme-Terre-Mer.

Céréales



Aliments pour animaux



Viande et lait

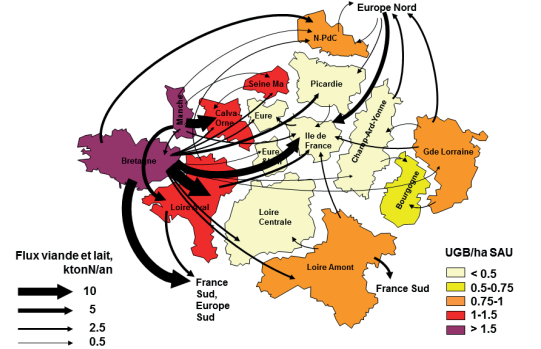


Figure 1 : Flux d'échanges commerciaux (exprimés par leur contenu en azote) de céréales, d'aliments pour animaux (soja et tourteaux) et de produits animaux (viande, œufs et lait), entre les régions agricoles du nord de la France et avec l'étranger en 2006. Données SitraM (d'après Le Noë et al., 2016). En fond de carte sont représentées la production de céréales par ha de surface agricoles (figure du haut) et la densité de bétail (en unité gros bétail par ha de surface agricole) (figures du bas).

participe donc à la production de gaz à effet de serre. Enfin, à système agricole constant, la séquestration du carbone dans la matière organique des sols agricoles à un taux annuel de 4‰, qui pourrait participer à l'atténuation du réchauffement climatique en diminuant la quantité de CO₂ dans l'atmosphère, paraît aujourd'hui inatteignable. C'est pourquoi les chercheurs du PIREN-Seine travaillent depuis des années sur des pistes alternatives au système agroalimentaire actuel, et sur des systèmes agricoles biologiquement et économiquement viables pour le bassin de la Seine. Grâce au suivi d'un réseau historique d'agriculteurs conventionnels et biologiques (ABAC), les études de rendement et d'utilisation d'intrants s'appuient aujourd'hui sur des données solides et permettent de proposer des scénarios de futurs du bassin.

Enfin, en collaboration forte avec le programme OCAP (Optimisation des cycles Carbone, Azote et Phosphore en ville), les chercheurs du PIREN-Seine participent à la réflexion autour de la gestion future des excréments des populations urbaines, afin de permettre leur retour aux terres agricoles pour les utiliser comme engrais naturels. La séparation à la source de l'urine, étudiée actuellement dans plusieurs pays européens, pourrait ainsi participer à la fin de la dépendance aux engrais synthétiques, et reconnecter les zones urbaines aux zones agricoles qui les alimentent.

Focus sur : LES EXPLOITATIONS PILOTES DU BASSIN DE L'ORGEVAL

Le bassin versant de l'Orgeval est un territoire agricole de la Seine-et-Marne, dans la Brie. C'est l'un des sites ateliers du PIREN-Seine, instrumenté depuis plusieurs décennies, notamment par INRAE, et permettant le suivi à long terme de certains paramètres hydrologiques et biogéochimiques.

Plusieurs exploitations agricoles de ce bassin versant font partie du réseau de suivi du programme. Certaines ont opéré le tournant complet de l'agriculture biologique, d'autres relèvent de l'agriculture conventionnelle, et leur étude permet de tirer des enseignements directs sur les effets des différentes pratiques sur l'eau et les milieux aquatiques.

On synthétise



Le PIREN-Seine a édité en 2019 une fiche 4 pages, intitulée « L'agriculture et ses effets sur l'eau et les milieux aquatiques » ainsi qu'en 2024 une autre fiche « Etat des lieux des filières agricoles du bassin de la Seine », qui résument les résultats de recherches dans ces deux domaines.

Disponible en téléchargement sur le site du PIREN-Seine :

https://piren-seine.fr/publications/fiches_4_pages/lagriculture_et_ses_effets_sur_leau_et_les_milieux_aquatiques

https://piren-seine.fr/publications/fiches_4_pages/etat_des_lieux_des_filières_agricoles_du_bassin_de_la_seine

Les pesticides, une pression qui se poursuit

Une des spécificités de l'agriculture moderne est le recours à des produits chimiques qui ciblent et détruisent les organismes nuisibles pour les cultures : les pesticides. Ces herbicides, insecticides ou fongicides sont des substances qui permettent certes de limiter les pertes de rendements agricoles, mais dont les conséquences sur la biodiversité, l'environnement et la santé humaine sont parfois encore inconnues. Utilisés massivement depuis les années 1960, les pesticides sont régulièrement interdits d'utilisation au fur et à mesure que l'on met en évidence leur persistance dans le milieu naturel ou leurs effets parfois dangereux sur la santé humaine ou sur l'environnement. Les substances incriminées sont donc constamment remplacées par de nouvelles molécules, le plus souvent plus puissantes, qui sont à leur tour étudiées par les scientifiques, et ainsi de suite. Ce phénomène de « vagues de pesticides » a été mis en lumière par les scientifiques du PIREN-Seine au début des années 2000, et dénote du caractère de course à la performance de l'industrie agroalimentaire.



Outre les problèmes qu'ils peuvent poser pour la santé humaine, les pesticides utilisés sur les sols agricoles se retrouvent majoritairement dans l'environnement, et plus particulièrement dans les masses d'eau. Que ce soit par le phénomène d'infiltration ou de ruissellement, ces substances atteignent les nappes phréatiques et les cours d'eau, dans lesquels ils peuvent résider pendant une longue période et se dégrader en d'autres substances, elles-mêmes potentiellement nocives. Cette présence de pesticides entraîne des déclassements de certaines nappes dans le bassin de la Seine, et la rend impropre à la consommation humaine. Ainsi, en Seine-et-Marne, près de 30 captages souterrains ont été abandonnés en 10 ans à cause de la pollution aux pesticides.

Même si 90 % des pesticides sont d'origine agricole, il ne faut pas négliger les traitements réalisés en zone urbaine. Dès 1997, les chercheurs du PIREN-Seine ont étudié le ruissellement des désherbants utilisés sur les voiries et ont montré que 50 % du glyphosate des rivières pouvait provenir des zones urbaines. En 2007, des travaux menés en collaboration avec le programme d'action Phyt'Eaux Cités sur le bassin de l'Orge, une rivière particulièrement urbanisée, ont montré qu'il était possible de préserver la qualité des cours d'eau par la formation des applicateurs à d'autres pratiques de désherbage. Une conclusion visionnaire : 10 ans plus tard, la loi Labbé interdit maintenant l'utilisation des pesticides de synthèse, dont le glyphosate, sur les voiries et les espaces publics en France.

La contamination par les pesticides demeure, et depuis longtemps, un domaine d'intérêt majeur dans le bassin de la Seine. C'est donc naturellement que le PIREN-Seine a développé ses recherches sur ce thème dès ses débuts en 1989. En 35 ans, de nombreuses études ont été menées, depuis les organochlorés dans les sols et l'atmosphère parisien, la découverte des triazines dans les pluies, le ruissellement du diuron et du glyphosate, jusqu'à la persistance des produits de dégradation dans les eaux souterraines. De telles études nécessitent un investissement particulier, tant dans la détermination des usages de pesticides que dans le suivi de la contamination. Les enjeux actuels sont de mettre en relation la contamination du milieu avec les effets sur la santé humaine et des écosystèmes.

On modélise !

Le PIREN-Seine a contribué à développer depuis 2006 un modèle de transfert des pesticides. Les données sur les usages phytosanitaires passés sont traitées et intégrées dans la base de données ARSeINE. Puis le modèle agronomique STICS d'INRAE a été modifié pour simuler le lessivage des pesticides dans PeSTICS. Ce modèle couplé au modèle hydrogéologique MODCOU a été testé sur les bassins expérimentaux de l'Orgeval et de la Vesle, des sites de référence du PIREN-Seine pour plusieurs pesticides comme l'isoproturon, et l'atrazine.

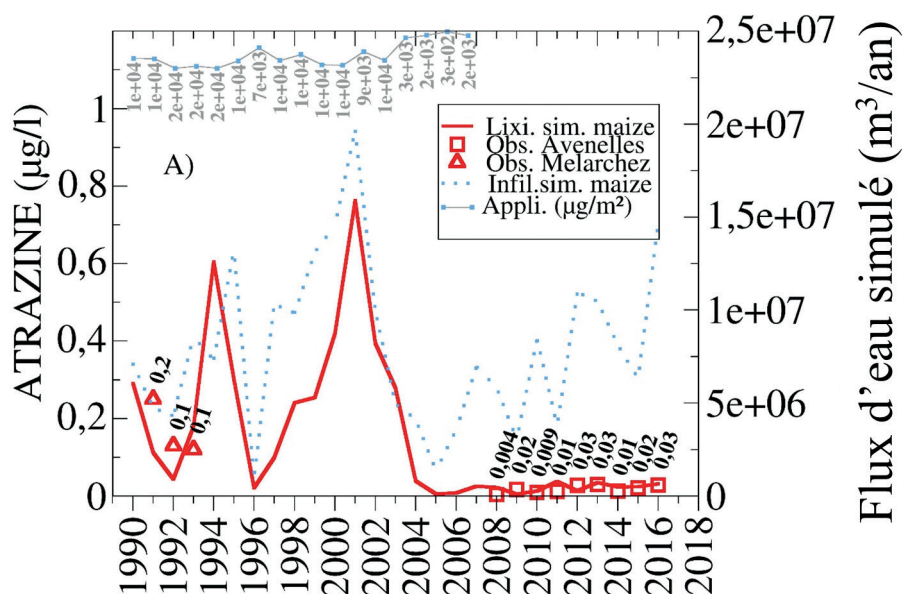


Figure 2 : Concentrations en atrazine observées (carrés et triangles rouges) et simulées (trait rouge) dans l'Orgeval et les volumes d'eau écoulés (trait pointillé bleu ; échelle de droite). L'atrazine a été interdite en 2004 dans l'Union européenne.

Focus sur :

LE BASSIN VERSANT SEMI-URBAIN DE L'ORGE

De nombreuses thématiques du PIREN-Seine se croisent sur le bassin versant de l'Orge, qui présente à la fois des caractéristiques urbaines et périurbaines. Très végétalisée sur sa partie amont, l'Orge traverse plusieurs villes avant de se jeter dans la Seine, et a subi lors du dernier siècle de très nombreux aménagements artificiels, allant jusqu'à la bétonisation du lit de la rivière.

Les équipes du programme y ont étudié le ruissellement vers la rivière des pesticides en milieu urbain, les micropolluants et leur transfert dans la chaîne trophique, ou encore les conséquences de l'affaissement de certains ouvrages et leur impact sur la continuité sédimentaire et piscicole du cours d'eau. Plus récemment des travaux sur l'antibiorésistance et ses conséquences sur les écosystèmes ont été lancés.

Le métabolisme territorial

L'occupation du bassin de la Seine par les humains a entraîné de nombreuses et profondes modifications environnementales, les plus importantes ayant eu lieu lors des 150 dernières années. La concentration d'une population croissante dans les grands centres urbains a provoqué un remodelage du rapport à l'eau et à l'alimentation, et a durablement modifié les flux de matières et d'énergie dans le bassin, pour répondre à une consommation toujours plus importante de la part des sociétés humaines.

Les recherches sur l'empreinte environnementale des villes ont ainsi débuté en 2006 au sein du programme, avec des travaux sur les matériaux de construction, les sols, l'énergie et l'alimentation. Au fil des années, la caractérisation des impacts de l'activité humaine sur l'environnement s'est affinée, et a permis d'englober les activités du système agroalimentaire, le comportement de consommation des populations, et les politiques publiques d'aménagement du territoire dans un vaste ensemble d'études des flux et de la géographie sociale et physique du bassin : le métabolisme territorial. Par la caractérisation des flux de matières et d'énergie mis en jeu par les sociétés humaines, le métabolisme territorial permet de caractériser de façon systémique les relations que celles-ci entretiennent avec la biosphère, et réciproquement.

Ce prisme de lecture englobant le territoire et la société qui l'habite permet de travailler sur les impacts sur l'eau et l'environnement à une échelle macroscopique, à la fois spatiale et temporelle, s'intégrant ainsi parfaitement dans la vision globale du bassin qui se trouve au cœur des préoccupations du PIREN-Seine. Participant activement à la recherche trans- et interdisciplinaire, l'étude du métabolisme territorial implique des équipes spécialisées en urbanisme et aménagement, en agriculture, en biogéochimie, en hydrologie et en histoire, afin de décrire l'ensemble des mécanismes liés à l'occupation des sols et aux liens entre les tissus urbains et agricoles : modes de production et de transport, gestion de déchets, alimentation en eau, etc.

Des travaux historiques ont ainsi été menés sur le système d'alimentation et d'excrétion de l'agglomération parisienne, sur les réseaux de transports de marchandises alimentaires dans le bassin, et sur l'analyse des signaux faibles dans les politiques de transition écologique. Les habitudes alimentaires et les processus menant l'acheminement des denrées alimentaires vers les habitants du bassin ont été étudiés pour dégager des éléments permettant la construction d'un gradient d'impact des modes de consommation (bio, locavore, hédoniste des marques, etc.) sur l'environnement.

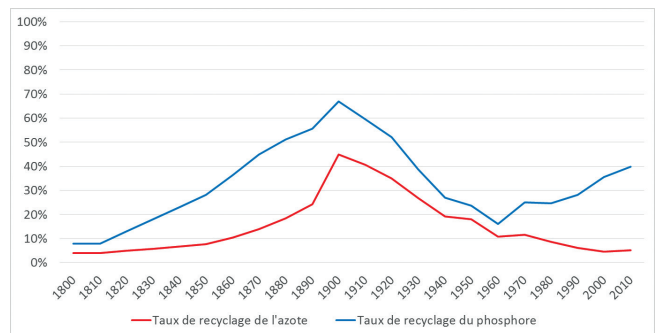
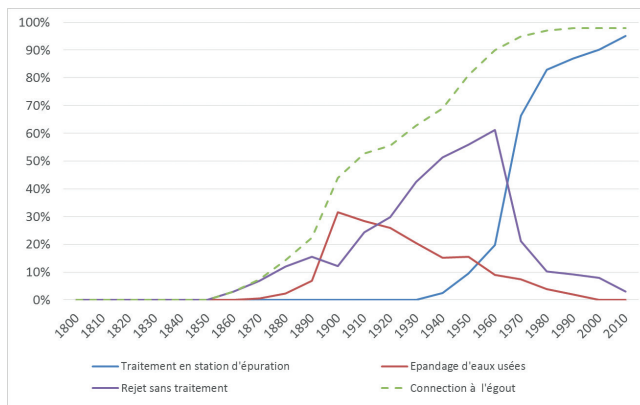


Figure 3a et 3b : Evolution des techniques de traitement des excréments de l'agglomération parisienne (1), et taux de recyclage de l'azote et du phosphore (2) de 1800 à 2010.

Les travaux associant histoire des techniques et de l'environnement urbain d'une part et biogéochimie d'autre part ont permis de montrer que la valorisation des excréta urbains au XIX^e siècle (par la fabrication d'engrais puis l'épandage agricole des eaux usées) s'est accompagnée d'une croissance sans précédent des taux de valorisation de l'azote et du phosphore. Au XX^e siècle, la mise sur le marché d'engrais réputés plus performants a sonné le glas de la valorisation, conduisant à une décroissance des taux de recyclage, ainsi qu'à la contamination des milieux aquatiques.

Source : Esculier, F., Barles, S. Ouvrage PIREN-Seine

On synthétise



En 2021, a été édité un fascicule qui revient sur l'évolution de la relation très forte entre Paris et le reste du bassin notamment à travers le prisme de l'eau.

Disponible en téléchargement sur le site du PIREN-Seine :

https://piren-seine.fr/publications/fascicules/le_metabolisme_de_lagglomeration_parisienne

Les études les plus récentes dans le domaine ont notamment permis de faire un état des lieux du métabolisme territorial du plateau de Saclay, un territoire aux enjeux multiples en termes d'emploi, de transport, d'aménagement, d'agriculture et d'alimentation des populations.

Ce territoire a aujourd'hui une fonction agricole importante (céréalière en particulier), grâce à des sols très riches. Pourtant, il contribue très peu à nourrir ses habitants, dont l'approvisionnement s'inscrit essentiellement dans les filières mondialisées de la grande distribution, tandis que leurs excréments sont gérés via les réseaux d'assainissement et de déchets : on observe ainsi une déconnexion totale entre production et consommation. Les projets en cours sur le plateau visent à favoriser un métabolisme plus circulaire et plus localisé : la quantification du métabolisme permet alors d'en tester la faisabilité.

D'autres études ont permis d'affiner le travail de caractérisation des éléments propres à une transition socio-écologique, et d'en faire un objet de comparaison avec les différentes transitions technologiques qui ont

animé l'humanité depuis la Préhistoire. Les recherches menées autour du changement potentiel du système agro-alimentaire actuel permettent également de nourrir des scénarios réalistes pour les futurs du bassin, et de participer activement au développement des exercices de prospective du programme.

Enfin, ces travaux ont permis de considérer l'application de cette échelle macroscopique et territorialisée à d'autres domaines d'étude que les tissus agricoles et urbains et le système agro-alimentaire. Les recherches menées depuis plusieurs années au PIREN-Seine sur les contaminants sont en effet aujourd'hui très bien documentées sur leur caractérisation, leurs sources, et leur devenir dans le milieu. La possibilité d'inclure les aspects sociétaux, les flux globaux et les politiques publiques dans l'analyse des contaminants sur le bassin de la Seine est donc aujourd'hui à l'étude au sein du programme, afin de proposer à l'avenir une vision toujours plus globale et fidèle du fonctionnement du bassin de la Seine.



Focus sur : L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE

Cœur économique et démographique de l'Île-de-France, l'agglomération parisienne exerce une pression sans commune mesure sur la Seine, et les milieux aquatiques qui lui sont associés. Cette zone urbaine densément peuplée fait donc logiquement l'objet d'un suivi continu depuis 1989 et les débuts du PIREN-Seine. Si son impact sur la qualité de l'eau est étudié depuis cette date au prisme de la biogéochimie par plusieurs équipes du programme, une approche macroscopique et historique a été initiée au début des années 2000 pour comprendre non seulement son impact global, mais également son rôle dans le métabolisme territorial du bassin de la Seine.

Quelques données sur l'agglomération parisienne		1801	1906	2015
Population		547 756	4 370 000	10 706 072
Surface urbanisée	km ²	37	293	2 845
	m ² /habitant	68	67	266
Consommation d'eau	Mm ³ /an	3	328	1 172
	l/hab/j	14	206	300
Consommation d'énergie primaire	PJ/an	14	109	1 338
	GJ/hab/j	25	25	125
Consommation d'énergie finale	PJ/an	13	105	749
	GJ/hab/an	24	24	70
Combustibles fossiles dans la consommation d'énergie primaire %		0	84	93
Émissions de carbone	ktC/an	0,2	-	9 557
	kgC/hab/an	0,4	-	893

Tableau 1 : Les transformations du métabolisme de l'agglomération parisienne, XIX^e-XXI^e siècles.

Au cours des deux derniers siècles, les flux de matières et d'énergie urbains ont connu une très forte croissance, non seulement du fait de l'augmentation de la population, mais aussi du fait de celle de la consommation par habitant. Ceci s'est accompagné d'une forte artificialisation des sols et de la croissance des émissions de toute nature, dont celles de carbone.

Source : Barles, S. *Urban metabolism*, in : *Concepts for urban-environmental metabolism*, 2020.



CHAPITRE 2



Les contaminants du bassin

Fort d'une population atteignant en 2024 plus de 18 millions d'habitants, le bassin de la Seine est également une des régions les plus industrialisées de France, avec 40 % de la production industrielle nationale. Si les réglementations successives ont permis d'améliorer substantiellement la qualité de l'eau depuis les années 1970, la pollution liée aux activités humaines, qu'elle soit issue des produits pharmaceutiques, de l'industrie ou des transports, continue d'exercer une pression sur les milieux aquatiques et les organismes qui y vivent.

Dès les débuts du PIREN-Seine en 1989, la question des contaminants liés aux rejets de l'agglomération parisienne a été centrale dans les recherches menées par les équipes

du programme. Des métaux aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), des polluants organiques persistants (POP) aux résidus médicamenteux, des pollutions historiques aux contaminants émergents, les travaux abordent une large palette des menaces qui pèsent sur l'environnement du fait des activités humaines.

Combinant des méthodes de caractérisation fine de certaines familles de polluants à des études chronologiques sur de longues périodes grâce aux archives sédimentaires en passant par l'analyse des effets des contaminations sur le biote, ce programme permet aujourd'hui d'avoir une vision à la fois fine et globale de la contamination du bassin.



L'histoire sédimentaire de la contamination



Les pollutions environnementales sont d'autant plus médiatisées qu'elles sont visibles. Un déversement de produits dangereux suite à un accident d'usine, ou une remontée subite de milliers de poissons morts sont des illustrations marquantes de la contamination des milieux aquatiques. Mais ces événements ponctuels masquent un aspect pourtant important de la pollution de l'environnement : la contamination de fond sur le long terme des sédiments.

Lors de la phase 8, différentes carottes de sédiments ont été prélevées sur le bassin versant de la Seine. Certaines de ces archives sédimentaires couvrent entre 60 et 150 ans, permettant d'envisager de reconstituer les trajectoires passées d'une grande diversité de contaminants organiques (pesticides, produits pharmaceutiques, PFAS, HAPs, etc.). La géographie des prélèvements permet de nous éclairer à la fois sur l'impact de l'agglomération parisienne sur la qualité historique de la Seine avec une archive à l'amont et une à l'aval de celle-ci, et sur la reconstruction de la trajectoire de la contamination du compartiment atmosphérique. Dans certains cas, les trajectoires reconstituées en contaminant organiques sont inédites à cette résolution comme pour les polluant éternels (PFAS). Elles pourront aussi, dans le cas de contaminations moins émergentes, être mises en perspectives avec des suivis historiques du compartiment atmosphérique (mesure de HAPs et PCBs) et être comparées à des pressions ponctuelles sur le bassin versant, qui concerne surtout les produits pharmaceutiques et les pesticides.

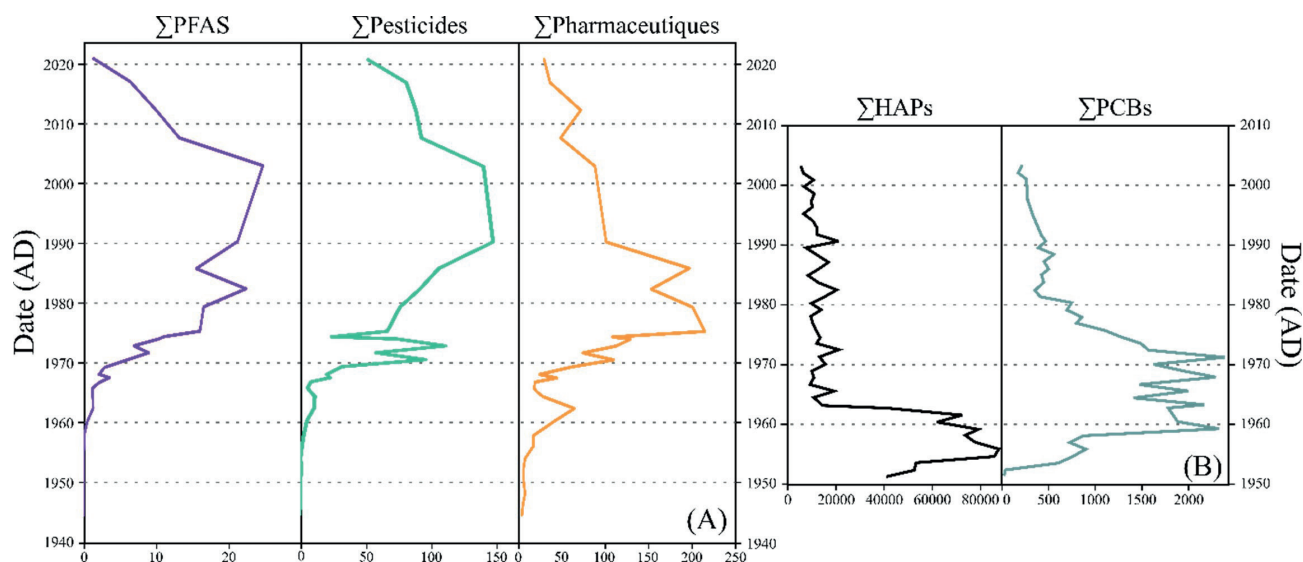


Figure 4 : Teneurs sédimentaires (en ng.g-1) en aval de l'agglomération parisienne en somme de PFAS, pesticides et produits pharmaceutiques pour l'archive de Vernon (A) et en somme de HAPs et PCBs, pour l'archive de Bouafles (B).

Avec la définition du bruit de fond, l'étude des carottes sédimentaires permet de comprendre l'impact des activités humaines à travers plusieurs prismes. Parce qu'elles conservent les traces des pollutions passées, les carottes sédimentaires jouent le rôle d'archives historiques naturelles. En les étudiant, il est donc possible de retracer l'histoire des contaminations d'un bassin-versant, et d'établir des liens entre l'introduction de nouveaux produits et de nouveaux usages dans la société humaine impliquant une contamination de l'environnement. C'est notamment grâce à ces études que les pics de pollution ont pu être identifiés, comme celui des HAPs dans les années 1950-1960, ou des métaux et des polychlorobiphényles (PCB) dans les années 1960 et 1970. Même si la pollution à certains de ces produits demeure persistante aujourd'hui, elle est sans commune mesure avec les effets des booms industriels des trente glorieuses, dans une période où les réglementations environnementales commençaient à peine à émerger, avec notamment la première loi sur l'eau de 1964.

Un des aspects importants de l'étude des carottes sédimentaires est d'ailleurs lié à cette lecture sociétale de la contamination. Car si les archives sédimentaires renseignent sur l'histoire de la pollution des milieux, elle donne également des pistes de compréhension sur la diminution de cette contamination que l'on observe même

pour les contaminants dits émergents, et donc sur les leviers d'action qui les ont permises. Couplée à une analyse historique des activités industrielles et des réglementations associées à ces activités, l'étude des archives sédimentaires a ainsi permis de mesurer les effets de la sortie progressive du charbon comme ressource énergétique principale dans les années 1960, ou des mesures prises face à la découverte de la toxicité de certains métaux tels que le mercure ou le plomb. Comprendre les mécanismes qui ont permis dans le passé d'atténuer, voire d'éliminer la pollution par certains produits permet de fournir des aides précieuses à la décision dans la lutte contre les pollutions actuelles ou futures, liées à l'émergence de nouveaux contaminants.

Enfin, si les sédiments peuvent servir d'archives, c'est parce qu'ils stockent une partie des contaminants présents lors de leur formation, contaminants qui peuvent alors être remis en suspension en cas d'événements hydrologiques particuliers. Cette remobilisation oblige à considérer la pollution passée comme un héritage, qu'il faut alors surveiller et gérer pour éviter des recontaminations des milieux aquatiques. Pour cette raison, les processus de sédimentation et de remobilisation des contaminants piégés, tels que le phosphore ou le zinc, sont étudiés depuis plusieurs années au sein du programme afin de prévenir les risques d'une pollution future.



On synthétise



Pour plus de détails, consulter le fascicule sur Les microcontaminants du bassin de la Seine.

Disponible en téléchargement sur le site du PIREN-Seine :

https://piren-seine.fr/publications/fascicules/les_microcontaminants_dans_le_bassin_de_la_seine



Les micropolluants, entre héritages et usages actuels



Si la pollution des masses d'eau par les industries a très fortement diminué depuis les années 1970, elle n'en reste pas moins présente actuellement sur le bassin de la Seine et continue d'imposer une pression constante sur les milieux aquatiques. Parmi les contaminants les plus suivis au PIREN-Seine lors des dernières décennies se trouvent les micropolluants organiques. Ces substances, qui ont la particularité de présenter des risques de pollution même à des doses infimes, sont d'origines et de natures diverses, et regroupent des centaines de molécules différentes.

Les polluants organiques persistants sont des composés organiques dont le caractère toxique ou polluant a été établi par la Convention de Stockholm, un accord international de limitation et d'interdiction de certaines molécules signé et ratifié par la France en 2001. Ils peuvent soit être produits avec un objectif industriel, soit résulter d'une combustion produisant les HAPs. Dans le premier cas, certains composés organiques sont utilisés dans une multitude de produits de consommation tels que les ustensiles de cuisine, les textiles, les emballages ou les produits nettoyants. Ces composés organiques forment ainsi un vaste groupe de molécules très diverses dont une grande partie se retrouve par la suite dans l'environnement.

Outre les pesticides, le PIREN-Seine a initialement concentré ses efforts sur 3 grands types de contaminants que sont les métaux, les HAPs, et les PCB. Les résultats obtenus dans les années 1990 et 2000 ont montré que pour les PCB et les métaux, les pollutions étaient aujourd'hui essentiellement héritées des émissions industrielles passées, dont la gestion à long terme demeurent prioritaire compte tenu du caractère remobilisable de ces molécules, l'agglomération parisienne représentant un stock important de ces composés (toitures, stockage domestique, etc.). Les HAPs demeurent en revanche omniprésents, du fait de l'utilisation des moteurs à combustion dans les zones les plus denses en réseaux routiers et autoroutiers.

Au tournant du millénaire, les travaux du PIREN-Seine se sont élargis à d'autres molécules d'intérêt. Toujours dans les composés organiques, les phtalates, le bisphénol A, les polybromodiphényléthers (PBDE), les alkylphénols et composés perfluoroalkylés ont été ajoutés à la liste des molécules traitées par le programme, dans le cadre de nombreuses thèses réalisées entre 2006 et aujourd'hui.

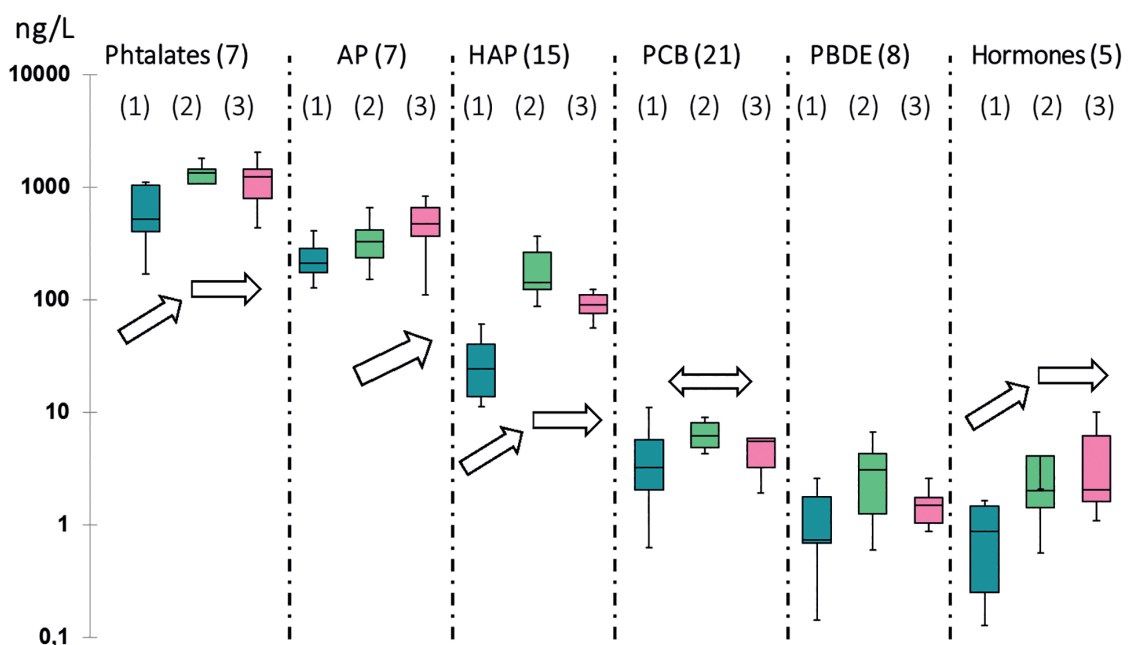


Figure 5 : Suivi de plusieurs contaminants sur l'axe Seine entre Marnay-sur-Seine (bleu), Bougival (vert) et Triel-sur-Seine (rose).

Enfin, depuis plusieurs années, les résidus pharmaceutiques sont suivis sur le bassin de la Seine. De nombreux médicaments sont retrouvés de manière quasi systématique dans la Seine et la Marne, à des doses très faibles, de l'ordre du ng/l, tels que les anti-inflammatoires, les antiépileptiques ou les bêtabloquants. Mais c'est surtout la présence d'antibiotiques qui fait l'objet d'une attention particulière. Norloracine, ofloxacine, ou encore sulfaméthoxazole sont les antibiotiques les plus retrouvés dans les effluents hospitaliers et urbains, mais ce sont plus d'une dizaine de molécules que l'on identifie aujourd'hui non seulement dans les eaux du bassin, mais également dans les tissus et organes des poissons qui y vivent. Cette contamination pose enfin le problème de l'antibiorésistance. Dans les eaux de rejet hospitalier, près de 70 % des *Escherichia coli* sont résistantes à au

moins un antibiotique. La présence d'antibiotiques pourrait en outre perturber le comportement des colonies de bactéries dénitrifiantes, dont le rôle est essentiel dans les écosystèmes aquatiques. Des études récentes ont également montré le rôle du microbiote digestif et cutané des poissons d'eau douce dans la dissémination et de la persistance l'antibiorésistance dans les milieux.

Les recherches sur ces micropolluants se poursuivent aujourd'hui au PIREN-Seine, afin d'affiner toujours plus la compréhension des processus de contamination et de pollution des milieux. Mais un des objectifs du programme est également de se renouveler au fur et à mesure de l'avancée des connaissances. En plus de suivi des molécules historiques, le PIREN-Seine travaille ainsi sur d'autres contaminants d'intérêt émergent.



Focus sur : L'AXE SEINE MARNAY-BOUGIVAL-TRIEL

La traversée de l'agglomération parisienne constitue pour la Seine un passage dans un environnement chargé de sources de contaminations diverses. Pour quantifier et évaluer l'importance de ces contaminations, les équipes du programme disposent de 3 points sur l'axe Seine, répartis stratégiquement en amont et en aval de la capitale.

Le premier point se situe à Marnay-sur-Seine, en amont de la Seine, territoire rural et peu urbanisé. Le deuxième est à Bougival, une commune en aval de Paris et de ses principaux rejets de temps de pluie, mais en amont de la station d'épuration de Seine aval. Enfin, le troisième et dernier point se trouve à Triel-sur-Seine, en aval de la station Seine aval et de la confluence avec l'Oise. Grâce à ce maillage, les chercheurs peuvent suivre les contributions en contaminants de chaque tronçon de la Seine autour de l'agglomération parisienne.

On synthétise



Le PIREN-Seine a édité en 2017 un fascicule sur les micropolluants dans le bassin de la Seine, qui résume des travaux du programme dans ce domaine.

Disponible en téléchargement sur le site du PIREN-Seine :

https://www.piren-seine.fr/publications/fascicules/les_micropolluants_dans_le_bassin_de_la_seine

Des nouvelles pollutions : les contaminants émergents



Si de nombreuses contaminations sont un héritage de pratiques passées, d'autres menaces de pollution apparaissent avec les nouveaux usages des industriels. Dès lors, la recherche scientifique doit s'adapter, développant de nouvelles méthodes de suivi et de caractérisation de ces nouveaux contaminants, comme c'est le cas au PIREN-Seine.

Les microplastiques sont une des pollutions les plus préoccupantes dans le monde, notamment grâce à la médiatisation des continents de plastiques dérivant au milieu des océans. Mais les milieux fluviaux ne sont pas épargnés par cette pollution, et jusqu'à récemment, les méthodes de détection de ces microplastiques dans les différents compartiments, atmosphère, sol et rivières, restaient peu étudiées, et n'étaient pas transposables telles quelles au bassin de la Seine. Les équipes du PIREN-Seine ont donc développé des méthodologies nouvelles pour évaluer la présence et les sources de microplastiques dans l'environnement.

Selon les derniers résultats, il apparaît que les microplastiques sont aujourd'hui omniprésents dans l'environnement du bassin de la Seine. La première et principale source de cette contamination sont les textiles vestimentaires. Présents sous forme de fibres de quelques dizaines de micromètres de diamètre, ces microplastiques se retrouvent aussi bien dans l'air que dans les rivières ou les eaux usées. Potentiellement porteuses d'additifs, de colorants ou d'autres produits chimiques utilisés dans l'industrie textile, les fibres présentes dans l'air se déposent à un rythme allant de 50 à 300 fibres/m²/jour dans l'agglomération parisienne.

Présents également dans l'eau sous forme de fragments, les microplastiques sont difficiles à échantillonner du fait de leur taille. Sur l'axe Seine, la présence de 1 à 3 fragments de plus de 50 µm par m³ d'eau a été relevée, en grande majorité issus de la dégradation de déchets macroplastiques. Les fibres vestimentaires, bien plus nombreuses, ne représentent pas moins de 20 à 100 éléments par m³.

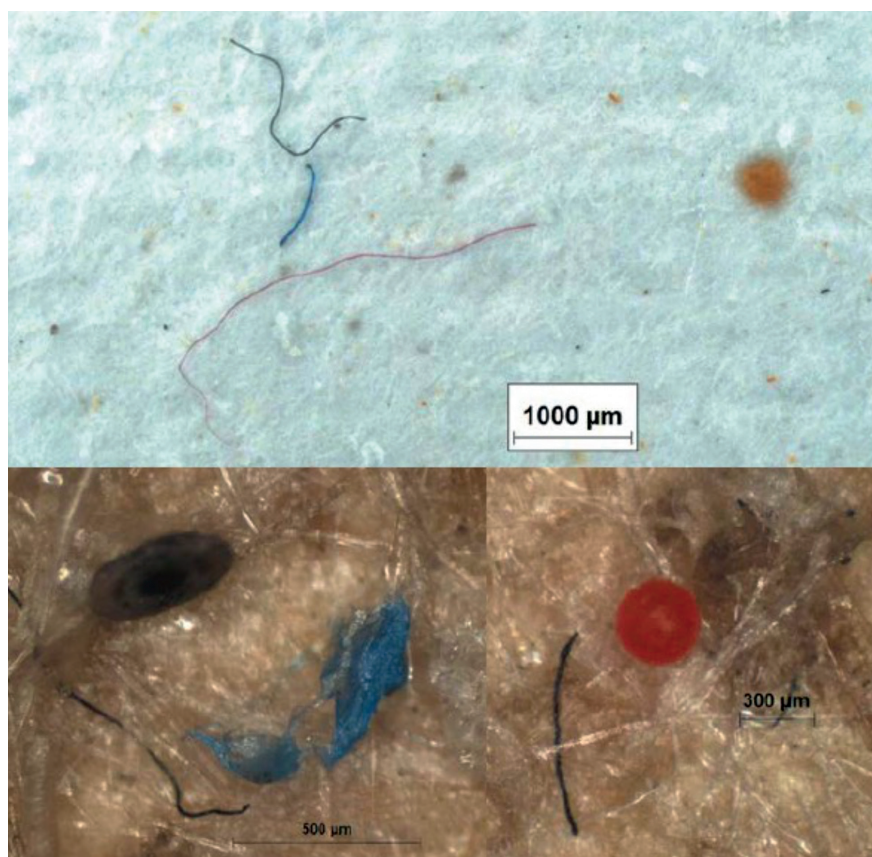


Figure 6 : Fragments de microplastiques retrouvés dans des échantillons d'eau de la Seine.

La présence de ces nouveaux contaminants pose la question de leur devenir : sont-ils ingérés par les poissons ? S'accumulent-ils dans les organismes ? Quel est leur potentiel de toxicité dans la chaîne trophique et les écosystèmes aquatiques ? Autant de questions auxquelles les chercheurs du PIREN-Seine s'attachent à trouver des réponses, en étudiant le transfert des microplastiques chez plusieurs espèces sentinelles comme le chevesne.

Autre contaminant représentatif de notre période industrielle, les nanoparticules représentent un défi scientifique tant dans leur détection dans l'environnement que pour l'évaluation de leur toxicité. Au PIREN-Seine, les recherches se sont portées sur deux éléments : les nanoparticules d'argent et de titane. Ces deux éléments

sont présents dans de très nombreux secteurs d'activité humaine. On les retrouve notamment dans les technologies de pointe, dans les crèmes solaires, mais également, pour l'oxyde de titane TiO_2 , comme additif alimentaire.

En appliquant la méthode « single-particle-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry » ou « spICPMS », la présence de nanoparticules d'argent et de titane a ainsi été confirmée dans le bassin de la Seine, en étudiant les eaux de drainage de 3 sous-bassins versants : un agricole, un urbain et un forestier. Si les études en la matière sont pour l'instant trop récentes pour déduire l'ampleur et les conséquences d'une telle contamination, elle apparaît d'ores et déjà comme non négligeable, à des concentrations comparables à celles du cadmium ou de l'arsenic.



On synthétise



Le PIREN-Seine a édité en 2018 une fiche 4 pages, intitulée « Recherche sur les microplastiques dans le bassin de la Seine », qui résume les résultats les plus récents du programme dans ce domaine.

Disponible en téléchargement sur le site du PIREN-Seine :

https://www.piren-seine.fr/publications/fiches_4_pages/recherches_sur_les_microplastiques_du_bassin_de_la_seine

Étudier le biote pour évaluer les contaminations

Face au défi que représente l'évaluation des contaminations des masses d'eau, les scientifiques du PIREN-Seine portent depuis des années un intérêt particulier à l'étude du biote comme indicateur de cette pollution. En effet, dans le cas des micropolluants et de leurs métabolites, leur détection dans l'environnement présente un certain nombre de difficultés liées, notamment, à la complexité des analyses, mais aussi à la faible concentration de ces produits. Par ailleurs, de nombreux constituants naturellement présents dans le milieu peuvent interférer avec ces molécules et rendre la tâche encore plus ardue aux scientifiques.

Ces différentes raisons ont donc amené les scientifiques du programme à étudier l'évolution des polluants au sein des organismes aquatiques — poissons, crustacés et mollusques — possédant des caractéristiques biologiques différentes comme leur écologie, leur mode d'alimentation ou leur position dans la chaîne trophique. En effet, l'accumulation des contaminants varie en fonction de l'écologie trophique des organismes, un organisme filtreur n'ayant pas la même exposition qu'un poisson piscivore ou qu'un détritivore.

Cette étude des transferts dans la chaîne trophique est d'autant plus essentielle que l'on peut observer une bioamplification, c'est-à-dire une augmentation

des niveaux de polluants des producteurs primaires, jusqu'aux prédateurs en haut de la chaîne. Ceci s'explique par l'ingestion de nombreuses proies contaminées, l'assimilation et le stockage de ces polluants chez les prédateurs. Cette dynamique dépend toutefois des contaminants environnementaux et des capacités d'excrétion des individus.

La caractérisation des contaminants dans le biote est importante, car elle est un reflet des usages et des activités humaines, qu'elles soient agricoles, industrielles ou domestiques et permet la mise en place de mesures de biosurveillance. Les travaux récents ont ainsi permis de quantifier le devenir des polluants dans les organismes à différents maillons du réseau trophique, et de mieux interpréter les liens entre exposition externe et interne en fonction des composantes environnementales et individuelles.

Ainsi, lors de la phase 8, les scientifiques se sont penchés sur le devenir des contaminants d'intérêt émergent au sein des réseaux trophiques du bassin versant de l'Orge. Ce bassin très urbanisé est soumis à des pollutions multiples dues aux systèmes de traitement des eaux usées, aux rejets accidentels, ou au ruissellement de substances sur les surfaces imperméabilisées.

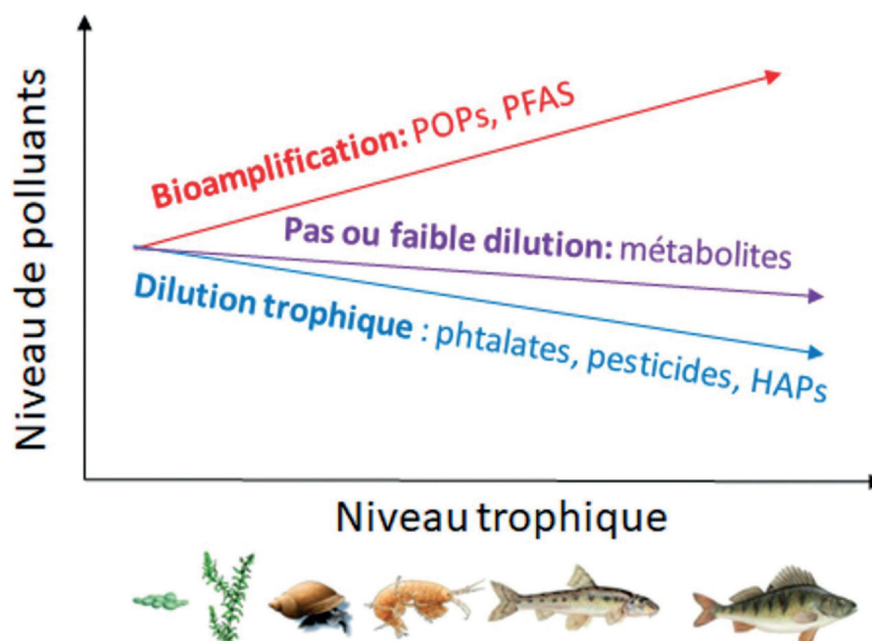


Figure 7 : Représentation schématique de la dynamique des polluants dans les réseaux trophiques.

C'est dans ce contexte que les teneurs de plus d'une centaine de contaminants historiques, des pesticides organochlorés au PCB, et/ou d'intérêts émergents, chloroalcanes, PFAS, phtalates, ou de leurs métabolites ont été analysés au sein des organismes aquatiques, à chaque maillon de la chaîne alimentaire, allant des producteurs primaires (biofilms, algues, végétaux aquatiques), en passant par les macroinvertébrés — gammarès, corbicules, notonectes, limnées et planorbes —, jusqu'aux poissons — goujons, chabots, perche commune, perche-soleil, tanche et poisson-chat.

Une bioamplification trophique est ainsi mise en évidence pour les pesticides organochlorés et les PCBs les plus hydrophobes, tandis qu'une dilution trophique est observée pour les chloroalcanes, les phtalates, les HAPs, les pesticides, et les antibiotiques. Les teneurs de ces contaminants diminuent le long de la chaîne alimentaire, de telle sorte que les prédateurs sont moins contaminés que leurs proies. Les effets de ces multiples contaminations sur le biote ont pu être étudiés grâce au déploiement de plusieurs méthodes innovantes, combinant des manipulations expérimentales en milieux naturels (encagement, implants) ou semi-naturels (mésocosmes aquatiques) et l'étude de plusieurs biomarqueurs (cf. encart) permettant d'évaluer les dommages potentiels qu'ils génèrent, à différentes échelles : moléculaire, de l'individu, de la population et pour finir des communautés biologiques.

Ces diverses approches complémentaires ont permis aux scientifiques d'établir un diagnostic de l'état de santé général des organismes, de prédire les conséquences en termes de traits d'histoire de vie des individus, mais aussi de considérer le caractère réversible des effets lorsque la pression chimique ou biologique cesse. Il reste malgré tout très difficile de décortiquer les relations de causalité entre une substance ou un mélange de substances chimiques et un ou des effets biologiques, compte tenu de la complexité des interactions écologiques et environnementales.

Focus sur : LES BIOMARQUEURS

Pour évaluer les effets d'une contamination d'un individu chez une espèce donnée, les scientifiques peuvent s'appuyer sur des biomarqueurs. Ces derniers correspondent à un changement observable, voire mesurable, sur les plans génétique, immunologique, cellulaire et/ou physiologique d'un organisme. S'il est possible d'étudier chacun indépendamment, c'est la combinaison de plusieurs biomarqueurs qui peut permettre d'établir un diagnostic de l'état de santé générale de l'organisme, et par extension de prédire les conséquences en termes de traits d'histoire de vie des individus.

Par exemple, au cours des phases 7 et 8 du PIREN-Seine une évaluation de la pression écotoxique via l'analyse des réponses hématocytaires de la dreissène après leur transplantation sur différents sites du bassin de la Seine (en amont et aval de l'agglomération parisienne) a ainsi été réalisée. Plus de détail sur la fiche 4 pages « Diagnostiquer les risques écotoxicologiques dans le bassin de la Seine », https://piren-seine.fr/publications/fiches_4_pages/ecotox



On synthétise



L'ensemble de ces recherches ont été compilées dans le fascicule « Le rôle du biote comme témoin de la qualité de l'eau de la Seine ».

Disponible en téléchargement sur le site du PIREN-Seine :
https://piren-seine.fr/publications/fascicules/le_role_du_biote_comme_temoin_de_la_qualite_de_leau_de_la_seine



CHAPITRE 3



Comprendre le fonctionnement des milieux

La géologie particulière du bassin de la Seine, caractérisée par un bassin sédimentaire principalement calcaire présentant très peu de relief, et sa situation géographique en climat tempéré en font la plus grande réserve d'eau souterraine d'Europe. Élément clef intervenant dans les grands cycles naturels géophysiques et biologiques, l'eau représente un objet d'étude fondamental dans la compréhension des processus physiques, chimiques et biologiques qui interviennent sur le bassin. Mais l'occupation de la région par l'Homme lors de ces derniers siècles a bouleversé les équilibres, et cette modification de l'environnement doit être mesurée et évaluée pour être intégrée dans la compréhension de l'anthropocosystème Seine.

Depuis les débuts du programme et les premières études sur la biogéochimie des lacs réservoirs aux travaux récents sur les interactions nappe-rivière et la construction d'un réseau de suivi haute fréquence du milieu, les équipes du PIREN-Seine ont diversifié leurs champs de compétence pour comprendre toujours plus finement le fonctionnement des milieux aquatiques. En associant études de terrain, modélisation et lien étroit avec les gestionnaires de l'eau et de l'environnement, le PIREN-Seine a permis de mieux comprendre les processus à l'œuvre dans les corridors hydroécologiques du bassin.

L'hydrogéologie du bassin : comprendre l'évolution des ressources en eaux

Dans le bassin de la Seine, une grande partie de l'eau potable consommée provient des nappes souterraines. La préservation de cette ressource, aussi bien sur le plan qualitatif que quantitatif, est une nécessité pour les gestionnaires de l'eau du bassin, et celle-ci passe, entre autres, par une compréhension fine des échanges d'eau, de chaleur et d'éléments dissous entre les eaux de surface (rivière, lacs, gravières) et les eaux souterraines. En trois décennies, le PIREN-Seine a su développer une vision intégrée de ces interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines en s'appuyant sur de nombreuses données issues de l'instrumentation du bassin et sur le développement d'outils numériques et de modélisations adaptés aux conditions et aux caractéristiques du bassin, afin de proposer des outils pertinents et mobilisables par les gestionnaires de l'eau.

Ces travaux de long terme ont permis de comprendre et de quantifier de nombreux phénomènes comme la contribution des aquifères aux eaux de surface. Les équipes du PIREN-Seine ont ainsi déterminé qu'en régime naturel, avant la construction des lacs-réservoirs (dont les principaux ont été créés entre 1966 et 1990) et des stations d'épuration, le débit de la Seine en période d'étiage est assuré par les formations aquifères à raison d'en moyenne 10 litres d'eau par seconde et par kilomètre de cours d'eau. A Poses, plus de la moitié du débit annuel de la Seine provient des aquifères. La quantification exacte de cette contribution reste à affiner grâce aux développements des méthodes d'analyse fréquentielle.

Les prélèvements en nappe ne sont donc pas sans conséquence sur cette contribution des aquifères au débit des rivières. Le pompage dans les eaux souterraines du bassin à destination de l'alimentation en eau potable ou

des activités anthropiques (industries, irrigation) contribue ainsi à réduire le débit de la Seine d'environ 10 m³ par seconde à Poses. Si cette réduction ne représente qu'un peu plus de 3 % du débit moyen annuel de la Seine, elle peut avoir des conséquences bien plus importantes en période d'étiage, où elle peut alors correspondre à 10 % du débit global.

Si les activités anthropiques ont un impact sur la quantité de la ressource en eau, le développement depuis les années 50 d'une agriculture intensive à forts intrants industriels a provoqué une augmentation régulière de contaminants présents dans l'eau, tels que les nitrates et pesticides. Comprendre les processus régissant le transfert et les temps de séjour de ces contaminants vers et au sein des nappes est donc un défi pour aider à atteindre le bon état écologique des masses d'eau prévu dans les objectifs de la DCE, et ainsi garantir dans le futur un accès à une eau de qualité. Le suivi de la contamination nitrique, première cause de déclassement des masses d'eau souterraine sur le bassin, a ainsi fait l'objet de plusieurs années d'études pour aboutir à une cartographie multi-échelle de ce type de pollution sur plus de 70 % des masses d'eau souterraine du bassin. Ces cartographies ont vocation à évoluer dans le futur, du fait du changement des pratiques agricoles et/ou des conditions climatiques. Elles contribuent de plus aux travaux prospectifs du programme autour des modes d'alimentation des Séquanais et sur l'adaptation au changement climatique, dont les effets potentiels sont anticipés à l'aide des outils de modélisation.

Le PIREN-Seine étudie donc avec minutie les processus de transfert de l'eau et des éléments qu'elle contient dans les différents compartiments du sous-sol, couplant des approches numériques et de terrain, ainsi que

On modélise !

Le PIREN-Seine s'est investi dans le couplage de modèles préexistants pour créer des chaînes de modélisation de plus en plus abouties comme le couplage STICS-MODCOU (cf. page 18) qui permet de simuler le transfert des nitrates des parcelles agricoles aux aquifères du bassin de la Seine. Lors de la phase 8 du PIREN-Seine, le modèle CaWaQS (*Catchment Water Quality Simulator*) a été développé avec notamment le déploiement d'un jumeau numérique du bassin de la Seine : CaWaQS-Seine. Cette application est le premier modèle complet de tout le système aquifère du bassin. Ces outils permettent également d'étudier les effets du changement climatique sur la ressource en eau du bassin de la Seine.

Découvrez notre fiche outil sur le modèle CaWaQS : https://piren-seine.fr/publications/fiches_outils/cawaqs

les compétences de plusieurs équipes en hydrologie, hydrogéologie, biogéochimie et géophysique. A titre d'exemple, il est aujourd'hui possible d'imager en deux dimensions les battements de la nappe phréatique autour d'une rivière. Cela permettra aux chercheurs de mieux caractériser les échanges nappe-rivière.

Enfin, l'adaptation au changement climatique représentant un enjeu majeur des prochaines décennies, le PIREN-Seine contribue à évaluer les conséquences actuelles et futures de ces changements sur la ressource en eau. En plus des

modélisations, des stations innovantes de Monitoring Local des échanges NAppe-Rivière (MOLONARI) ont été conçues à cet effet par les chercheurs du PIREN-Seine. Elles permettent notamment le suivi de la température et de l'évolution du régime thermique des différents compartiments présents à l'interface entre la nappe et la rivière. Ces travaux ont permis d'identifier une tendance à l'augmentation de la température de l'ensemble des eaux du bassin, de l'ordre de 0,1°C par an sur les 10 dernières années.

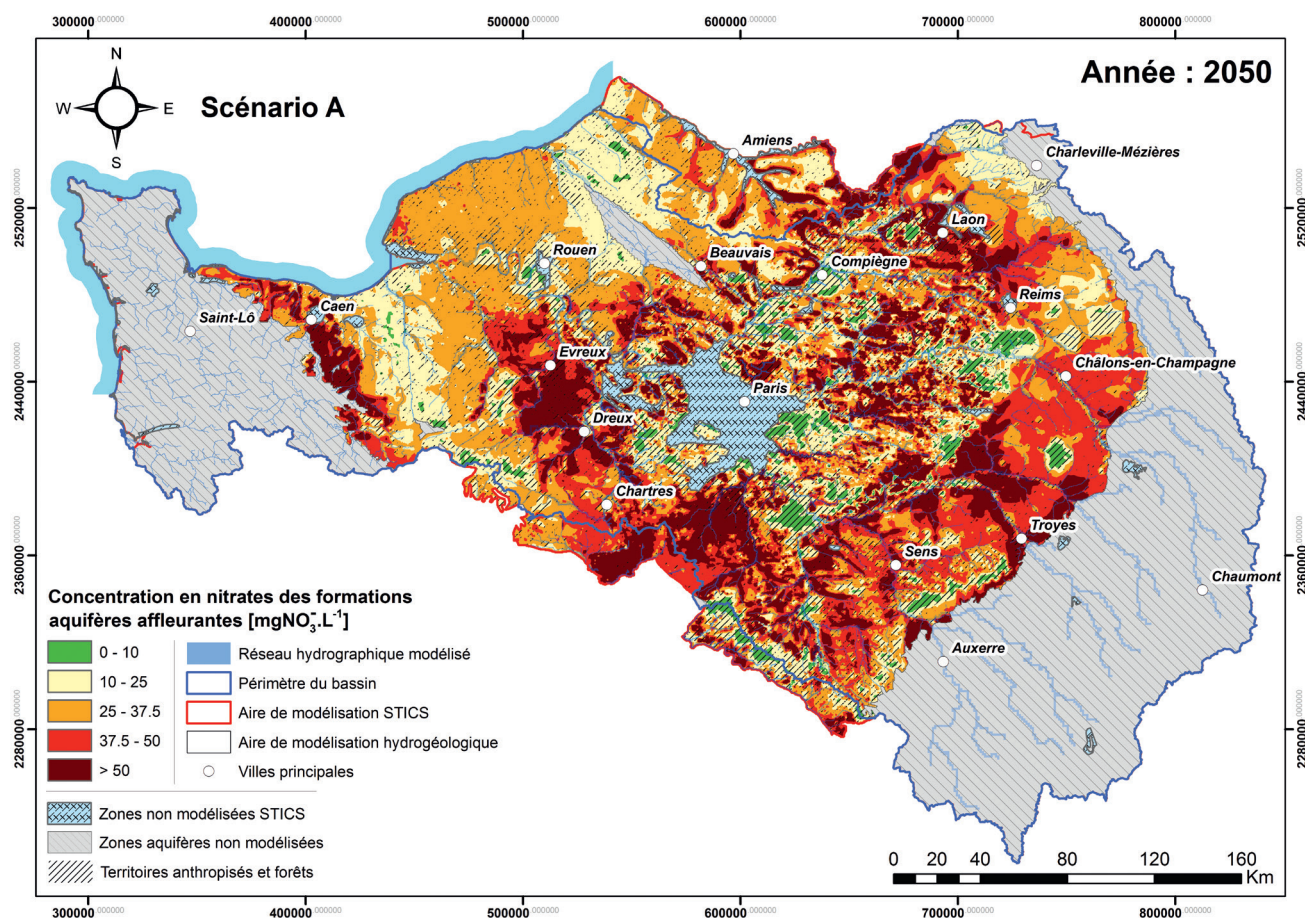


Figure 8 : Modélisation de la concentration en nitrate des formations aquifères dans le bassin de la Seine. Le seuil de 50mg/L de nitrate (rouge foncé) est le seuil de potabilité de l'eau.

Source : Rapport d'étude ARMINES/Mines ParisTech PSL,

« Modélisation de la pollution diffuse d'origine agricole des grands aquifères du bassin Seine-Normandie », 2018.

On synthétise



Le PIREN-Seine a édité en 2018 une fiche 4 pages, mise à jour en 2024, intitulée « Hydrologie du bassin de la Seine en quelques chiffres clefs », qui résume les résultats les plus récents du programme dans ce domaine.

Disponible en téléchargement sur le site du PIREN-Seine :

https://www.piren-seine.fr/publications/fiches_4_pages/hydrologie_du_bassin_de_la_seine_en_quelques_chiffres_clefs



La biogéochimie de l'axe fluvial



Si les eaux souterraines sont importantes à suivre pour les enjeux quantitatifs et qualitatifs de la ressource en eau potable, les eaux de surface font également l'objet d'un suivi très important sur le bassin de la Seine. Compartiment récepteur final des affluents, des eaux de ruissellement et des eaux usées après leur traitement en station de traitements des eaux usées (STEU) et des rejets de temps de pluie, l'axe fluvial de la Seine, de la confluence avec la Marne jusqu'au barrage de Poses, est un milieu profondément transformé par les activités humaines. En couplant résultats de terrain et chaînes de modélisation, le PIREN-Seine contribue depuis 35 ans à la construction d'un système de suivi de la biogéochimie de l'axe fluvial toujours plus pertinent pour les organismes en charge de la qualité de l'eau.

Ainsi, le programme a pris en charge dès son origine la conception et la mise en application en 1995 du modèle ProSe, qui intègre un ensemble de paramètres physiques, hydrologiques et biogéochimiques sur le bassin de la Seine. Régulièrement alimenté et mis à jour, ce modèle est utilisé aujourd'hui par le Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne (SIAAP), en charge de la dépollution des eaux usées de près de 9 millions de Franciliens.

Pour arriver à une compréhension et à une modélisation toujours plus précise des transferts d'éléments dans l'axe fluvial, le PIREN-Seine a successivement pris en compte des paramètres aussi divers que l'impact de la navigation sur la remise en suspension des sédiments du fond, le transfert des bactéries indicatrices de contamination fécale, le rôle des dynamiques benthiques dans les flux de nutriments de type azote, phosphore et carbone, l'impact des seuils sur la connectivité du réseau hydrographique, ou encore celui joué par la matière organique dans le transport de polluants. L'ensemble de ces paramètres ont été ajoutés et affinés au fur et à mesure des décennies, permettant aujourd'hui d'avoir une vision à la fois globale et minutieuse du fonctionnement biogéochimique de la Seine.

L'expertise du PIREN-Seine sur le suivi de la qualité de l'eau dans le bassin de la Seine est particulièrement reconnue, puisque le programme a été chargé d'assurer le travail d'analyse de la qualité de l'eau suite à la crue de la Seine de juin 2016. La centralisation, l'analyse et l'interprétation des données ont ainsi permis de faire un état des conséquences de cet événement exceptionnel sur la qualité de l'eau. La pertinence des travaux et de leur restitution ont incité les gestionnaires du bassin à refaire appel à l'expertise du PIREN-Seine pour la crue de 2018.

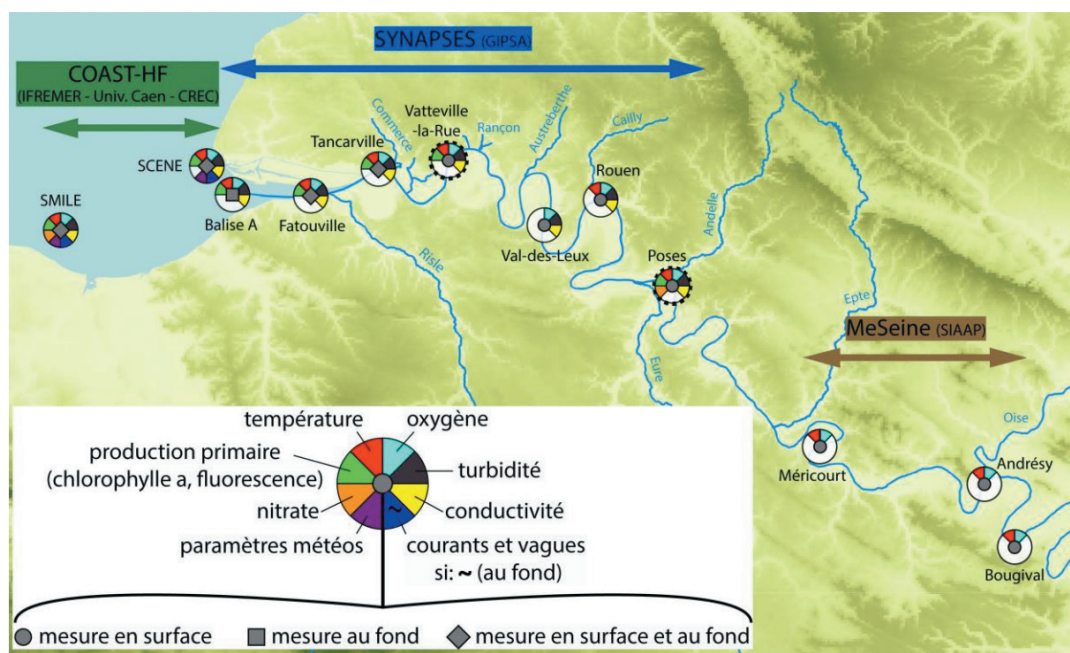


Figure 9 : Position des stations du méta-réseau et des paramètres mesurés à chaque station dans le cadre du projet PHRESQUES¹. Les deux nouvelles stations sont entourées en pointillé noir (Vatteville-laRue en aval et Poses en amont).
Source : GIP Seine-Aval

1 Découvrez l'observatoire de l'axe Seine <https://www.phresques.fr/>

On modélise !

Le logiciel ProSe, développé à partir du modèle RIVE par Mines Paris-PSL, simule l'hydrodynamique, le transport et le fonctionnement biogéochimique dans un réseau hydrographique. Utilisé notamment par le Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne (SIAAP), il prend en compte les nombreuses activités humaines qui s'exercent sur le bassin versant sous forme de rejets ponctuels (stations d'épuration et déversoirs d'orage) ou d'apports diffus (agriculture, ruissellement). Les impacts d'aménagements tels que les dérivations, les seuils ou les effets de la navigation sont également représentés. Très récemment une procédure d'assimilation de données a été intégrée au modèle. Les dernières avancées méthodologiques offrent une modélisation toujours plus précise de la qualité de l'eau qui servira aux futurs outils de la gestion de l'assainissement urbain.

Enfin, le programme s'implique dans la mesure haute fréquence du milieu à l'échelle du bassin Seine-Normandie dans son ensemble. Il a contribué à l'initiation d'un dispositif de suivi en continu de la qualité de l'eau cohérent à l'échelle du continuum Seine. Le dispositif nommé PHRESQUES (Projet d'Harmonisation et de REforcement du Suivi haute-fréquence de la QUALité de l'Eau de la vallée de Seine) est piloté par le GIP Seine-aval. Il permet

de coordonner les réseaux franciliens (SIAAP, Meseine Innovation), estuarien (GIP Seine-Aval, SYNAPSES) et marin (Ifremer, Université de Caen – Coast HF) assurant un suivi haute fréquence allant de la confluence Marne jusqu'à la Manche. La communauté scientifique contribue à l'innovation en termes de dispositifs de suivis et à la valorisation des données afin de cerner les dynamiques du fleuve.

Focus sur : LES GRAVIÈRES DE LA BASSÉE

La Bassée est l'un des territoires emblématiques des multiples enjeux liés à la gestion de l'eau dans le bassin de la Seine. Ce tronçon de la Seine amont, situé entre les confluences de l'Aube et de l'Yonne, a été modifié et artificialisé à de nombreuses reprises lors des deux derniers siècles, que ce soit par l'aménagement de canaux pour faciliter la navigation, ou par la création de lacs artificiels issus de l'exploitation des granulats : les gravières.

Les équipes du PIREN-Seine suivent de nombreux paramètres hydrologiques et biogéochimiques dans ces gravières par un réseau de stations piézométriques MOLONARI disposées de l'amont à l'aval du territoire, afin de comprendre la nature des échanges entre la Seine, les gravières et l'aquifère régional. Les gravières font d'ailleurs l'objet de conceptions de modules particuliers dans les outils de modélisation du programme, comme le module Libwet, développé en 2016 et s'intégrant dans la plate-forme CaWaQS. Mais ces gravières sont également étudiées dans leur interaction avec l'atmosphère pour comprendre le cycle du carbone dans ces systèmes encore mal connus, et leur rôle dans le stockage et l'émission de gaz à effet de serre. Une station météorologique flottante a ainsi été mise en place par les équipes du PIREN-Seine sur la gravière de la Cocharde, en plein cœur de la Réserve naturelle de la Bassée.



On synthétise



Le PIREN-Seine a édité en 2018 un fascicule sur les effets de la crue de 2016 sur la qualité de l'eau du bassin de la Seine.

Disponible en téléchargement sur le site du PIREN-Seine :

https://www.piren-seine.fr/publications/fascicules/les_effets_de_la_crue_de_juin_2016_sur_la_qualite_de_leau_du_bassin_de_la

Les zones humides : de l'hydraulique douce pour la gestion de l'eau

La connaissance des ressources en eau et de l'état des milieux aquatiques est un enjeu majeur pour la société humaine habitant le bassin de la Seine. L'eau est en effet au centre de très nombreuses activités humaines que ce soit pour l'hygiène, la potabilité, l'agriculture, les transports, l'industrie ou le risque lié aux inondations, et sa préservation qualitative et quantitative nécessite une compréhension et un suivi minutieux. Dès ses débuts, le PIREN-Seine a acté l'importance de considérer le bassin comme un système, et l'eau comme en étant un élément central à travers le concept de corridor hydroécologique. Parmi les différents milieux aquatiques, les zones humides riveraines des cours d'eau ont fait l'objet de travaux depuis 1989 afin de comprendre leur fonctionnement et leur intérêt dans la gestion de l'eau.

Dans une démarche de remontée vers l'amont pour construire une vision d'ensemble du bassin, les équipes du PIREN-Seine ont instrumenté et étudié les milieux aquatiques soumis à forte pression agricoles pour estimer l'impact des pratiques sur la qualité de l'eau. Après une première phase de prospection pour déterminer les zones les plus pertinentes à étudier, ils ont pu évaluer les effets tampons positifs de certaines zones humides comme les bandes enherbées et la mise en place de haies en bordure de champs. Cependant, ces zones végétalisées particulières ont également présenté leurs limites, les eaux de drainage pouvant court-circuiter les bandes enherbées et être directement rejetées dans le réseau hydrographique.

C'est pourquoi les travaux se sont progressivement déployés sur d'autres types de zones humides, présentant des capacités de rétention plus importantes : les Zones Humides Tampons Artificielles (ZHTA). Des ZHTA, qui consistent en des aménagements de petite taille, généralement des mares et des étangs, mais aussi des

anciennes cressonnières ou des tourbières, ont ainsi été instrumentées et suivies depuis les années 2000 par les équipes du PIREN-Seine afin d'évaluer leur pertinence dans la lutte contre la contamination aux nitrates et aux pesticides des cours d'eau riverains de parcelles agricoles. Et les résultats ont effectivement confirmé l'importance de ces aménagements tampons : dans certains cas, jusqu'à 40 % des nitrates et jusqu'à 70 % des pesticides peuvent être filtrés et dégradés à travers les ZHTA.

Mais au-delà de l'aspect technique de ces ZHTA, les chercheurs travaillent également aux mécanismes sociaux et environnementaux qui peuvent amener les acteurs du territoire, qu'ils soient élus, gestionnaires de l'eau, associatifs ou agriculteurs, à s'entendre sur l'aménagement de telles zones. En plus de suivre ces dispositifs, les équipes du programme organisent donc des ateliers de dialogue territorial pour amener les acteurs de l'eau et de l'environnement à échanger sur la thématique de la maîtrise des pollutions diffuses et de la protection de la ressource en eau. Ces ateliers contribuent à faire émerger collectivement des solutions « multi-objectifs » environnementaux en s'appuyant sur la complémentarité des actions : adaptation/réduction de la pression des intrants à la source et aménagement du territoire en promouvant les services écosystémiques fournis par les solutions fondées sur la nature.

Pour ce faire, des outils développés par INRAE et LISODE tels que *Mété'eau*, *Co-click'eau* et *Rés'eauolution* sont mis à l'épreuve, adaptés et utilisés dans des contextes d'ateliers participatifs, dont les résultats sont ensuite compilés par les chercheurs. L'objectif à terme étant de proposer aux pouvoirs publics des outils mobilisables pour atteindre les objectifs de bon état écologique des masses d'eau et participer à la bonne gestion de la ressource.



Focus sur :

LA ZHTA DE RAMPILLON, DANS LA BRIE

En partenariat avec les acteurs locaux du territoire de l'Ancoeur en Brie nangisienne, le projet mené par AquifBrie, le Syndicat des 4 vallées de la Brie et Irstea (actuellement INRAE) a abouti à la construction en 2010 d'une zone tampon humide artificielle en sortie de drainage d'un versant de 355 ha conduit en grande culture. L'objectif principal est d'améliorer la qualité des eaux alimentant une zone d'engouffrement, connectée à la nappe de Champigny. L'effort est centré sur la réduction des flux de pesticides dans les eaux de drainage, mais un focus a aussi été réalisé sur le transfert de nutriments (nitrate).

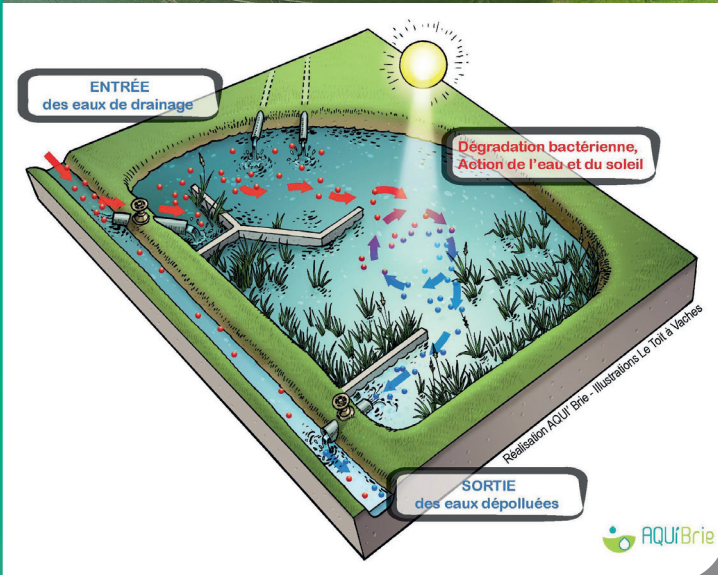


Photo et schéma de la ZHTA de Rampillon (Seine-et-Marne)

Sources : Photo INRAE, schéma AquifBrie/Le Toit à Vache

Après une concertation avec les agriculteurs, la ZHTA possède une surface de 5 600 m² et un volume de 2 500 m³, soit un ratio surface ZHTA sur surface drainée de 7 m³ par hectare drainé. Les coûts de l'étude, maîtrise d'œuvre et de la construction s'élevaient à 120 000 €, soit l'équivalent de 340 €/ha cultivé. Cette ZHTA expérimentale est suivie depuis 2012 et fait l'objet de plusieurs projets de recherche pour améliorer les connaissances sur son fonctionnement (hydrologique, cycle biogéochimique, biodiversité, sociologique, etc.). Les principaux résultats montrent une réduction moyenne de 15 % sur les nitrates, et de 22 % en moyenne tout pesticide confondu (variant de 80 % pour la pendiméthaline et le clopyralid), en lien avec son dimensionnement réduit. Aucune accumulation de pesticides n'a été révélée dans les sédiments, après 8 années de fonctionnement. D'autre part, la ZHTA émet peu de gaz à effet de serre. Cette expérimentation a été récompensée en 2014 par le prix National du Génie écologique, catégorie pollution diffuse.

La ZHTA de Rampillon a fait l'objet d'un fiche 4 pages sortie en 2022 : https://piren-seine.fr/publications/fiches_4_pages/effets_ZHTA_milieu_agricole



CHAPITRE 4



Les usages de l'eau, des trajectoires passées et présentes et futures

La relation entre l'homme et les milieux aquatiques est millénaire. Les villes se sont construites autour des fleuves, et les aménagements ont suivi les usages de l'eau des sociétés humaines : transport, pêche, baignade, irrigation, évacuation, énergie. Chacun de ces usages a entraîné et entraîne encore des modifications physiques et chimiques de l'environnement, mais nourrit également le regard que les populations portent sur l'eau. Notre appréhension de l'usage qui doit être fait de l'eau agit ainsi comme un levier important à sa gestion. Le PIREN-Seine mène depuis plus de 20 ans des travaux sur l'histoire des aménagements humains

sur le bassin de la Seine, et la question des usages s'est peu à peu installée au début des années 2000, avec l'arrivée dans le programme d'équipes de sociologues, d'historiens et de géographes. De l'étude historique des ouvrages humains à leur démantèlement pour restaurer un état écologique, du traitement « à la sortie des tuyaux » aux changements de pratique à la source, de l'analyse rétrospective de la qualité de l'eau aux exercices de prospective pour construire les futurs du bassin, le PIREN-Seine multiplie ses domaines de recherche pour proposer aux gestionnaires de l'eau une aide précieuse pour la prise de décision publique.

Les peuplements de poissons

Les activités humaines entraînent de nombreuses conséquences pour les écosystèmes aquatiques, dont les poissons représentent un des indicateurs du bon état écologique. C'est pourquoi ils sont étudiés au PIREN-Seine depuis 1989, principalement à travers le prisme de leur déplacement et de leur occupation du réseau hydrographique. Ces travaux, menés sur le long terme, ont permis de comprendre l'évolution du peuplement piscicole du bassin de la Seine au regard des aménagements et des activités de la société humaine.

Au PIREN-Seine, de nombreuses approches ont été couplées afin de caractériser au mieux le peuplement piscicole du bassin, mêlant recherche historique, mesures sur le terrain et modélisation. S'appuyant sur des données d'archive et sur des résultats archéologiques pouvant remonter jusqu'au XIII^e siècle, les travaux menés dans le programme ont permis de retracer l'introduction de certaines espèces telles que la carpe, la perche-soleil ou le poisson-chat. C'est ainsi que l'on a pu établir que sur la cinquantaine d'espèces de poissons aujourd'hui recensées en Seine, seules 32 en sont véritablement originaires.

Mais l'étude historique des populations de poissons a surtout permis de comprendre l'impact des aménagements construits par l'homme sur l'ensemble du bassin. Si certains ouvrages constituent des obstacles infranchissables entravant le déplacement de certaines espèces migratrices telles que le saumon ou l'alose, l'artificialisation du chenal a également joué un grand rôle dans la réduction des zones d'habitats nécessaires au cycle de vie de certains poissons, entraînant par exemple la disparition de frayères. Ainsi, les poissons, face à l'altération et la fragmentation des cours d'eau, ont plus de mal à accomplir leur cycle de vie.

Accompagnant les démarches de restauration adaptées pour assurer le maintien naturel des populations de poissons, le PIREN-Seine travaille au développement de modèles de connectivité piscicole et d'évaluation de la répartition des espèces. Développé en 2002 dans le cadre du programme, le logiciel Anaqualand 2.0 permet ainsi de modéliser la probabilité pour un poisson d'atteindre ses habitats vitaux, en fonction de ses capacités de mouvement et des aménagements présents sur le réseau hydrographique. Grâce à cette approche par la modélisation, des scénarios d'aménagement peuvent être construits pour évaluer les bénéfices et hiérarchiser les restaurations adaptées aux spécificités de chaque cours d'eau. Dans une certaine mesure, ces types de modèles peuvent permettre de simuler les effets du changement climatique sur la distribution des espèces de poissons.

Outre la construction de modèles performants et la reconstruction historique des peuplements de poissons, le programme s'investit également dans les nouvelles méthodologies de mesure sur le terrain. Ainsi, l'analyse de l'ADN environnemental (ADNe), pour évaluer les populations de poissons dans un milieu a été appliquée sur le terrain. La méthode consiste à filtrer une quantité d'eau pour récupérer les fragments d'ADNe et à analyser cet échantillon en laboratoire avec des techniques spécifiques de biologie moléculaire pour déterminer les espèces présentes dans le milieu. Cette méthode a obtenu des résultats pertinents dans la détection de près d'une vingtaine d'espèces de poissons. Pour autant en l'état, elle ne semble pas se substituer complètement aux méthodes de suivi traditionnelles. Mais une fois correctement intégré aux systèmes actuellement déployés par les scientifiques et les opérationnels, cet outil pourra constituer demain un dispositif supplémentaire précieux d'aide à la gestion de l'eau, pour faire face au défi que représente l'atteinte du bon état écologique.



On modélise !

Anaqualand 2.0 est un logiciel de modélisation de la connectivité dans les cours d'eau développé par INRAE depuis 2002 qui permet d'évaluer, pour une espèce de poisson et un cours d'eau donnés, les potentialités d'accès à des zones d'habitats nécessaires au cours du cycle de vie, en prenant en compte un grand nombre de paramètres tels que la pente, le débit, la profondeur, les embâcles, etc. Anaqualand a été couplé avec ProSe-Pa à l'aval du Grand Morin.



On synthétise



Le PIREN-Seine a édité en 2022 une fiche 4 pages sur l'ADNe et en 2023 une fiche 4 pages, intitulée « Continuité hydroécologique des cours d'eau : quels rôles et impacts des barrages de navigation ? », qui résume les résultats les plus récents du programme dans ce domaine.

Disponible en téléchargement sur le site du PIREN-Seine :

https://piren-seine.fr/publications/fiches_4_pages/adne

https://piren-seine.fr/publications/fiches_4_pages/continuite_hydroecologique_barrages_navigation

La modification de la géomorphologie

La capacité de l'être humain à modifier drastiquement son environnement pour servir un usage s'est appliquée sur l'eau depuis des milliers d'années. Sur le bassin de la Seine, les modifications les plus importantes ont eu lieu depuis le Moyen Âge. La construction de moulins et de barrages pour tirer parti de l'énergie hydraulique, l'artificialisation des berges et la mise en place d'écluses pour la navigation ont ainsi largement contribué à modifier la géomorphologie des cours d'eau. Certains de ces ouvrages sont encore présents à l'heure actuelle, alors même que leurs usages n'ont plus, ou très peu cours dans nos sociétés. Leur préservation peut être due à un attachement patrimonial ou architectural, mais dans nombre de cas, leur démantèlement éventuel se heurte à la difficulté d'établir la possibilité d'un retour à un état hydroécologique antérieur, voire d'en déterminer les conséquences réelles sur le milieu. C'est pourquoi les équipes du PIREN-Seine ont mené des recherches sur plusieurs fronts.

D'un point de vue historique, les aménagements qui ont eu lieu au cours des deux derniers siècles ont souvent fait l'objet de travaux documentés dont les archives peuvent rendre compte. En recherchant et en compilant ces données, il est ainsi possible de reconstruire les différentes phases d'aménagement d'un cours d'eau, et parfois de comprendre quel était l'état de ce cours d'eau avant l'intervention humaine. Mais surtout, ce travail permet de faire le lien entre l'aménagement d'un milieu et la société humaine qui l'habitait à ce moment-là, et de nourrir la réflexion sur les leviers politiques qui sous-tendent à de telles prises de décisions. Ce travail de compilation et d'agrégation est effectué depuis des années en partenariat avec les Archives Nationales à travers la plate-forme ArchiSEINE, qui propose des cartes historiques du bassin de la Seine. Géoréférencées et organisées, ces cartes sont mobilisables aussi bien en tant qu'objet pour une utilisation culturelle par des expositions virtuelles thématiques, qu'en tant que donnée pour une utilisation scientifique à travers une interface SIG (Système d'Information Géographique).

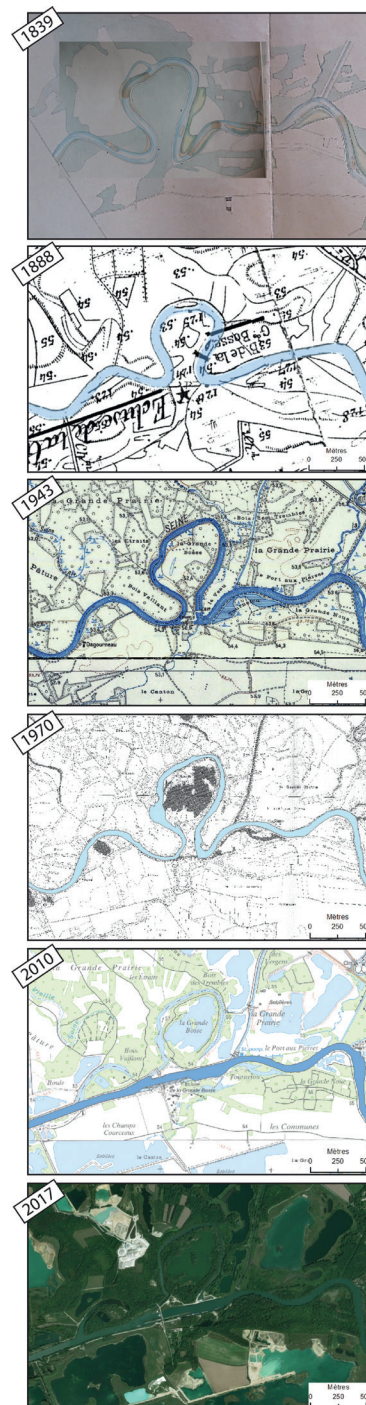


Figure 10 : Cartes anciennes dans le secteur de la Grande Bosse entre 1839 et 2010. Photo aérienne du même secteur en 2017.

© IGN pour les vignettes de 2010 et 2017, site Geoportail

On synthétise



Le PIREN-Seine a édité en 2023 une fiche 4 pages, intitulée Recherches récentes en hydromorphologie : quelles perspectives de restauration pour les cours d'eau du bassin de la Seine ?, qui résume les résultats les plus récents du programme dans ce domaine.

Disponible en téléchargement sur le site du PIREN-Seine :

https://piren-seine.fr/publications/fiches_4_pages/hydromorphologie_perspectives_de_restoration

En parallèle de ces travaux d'histoire, la compréhension de l'impact des aménagements est également menée à travers le suivi et l'étude physique des dynamiques liées à certains ouvrages. Certains de ces aménagements, comme les gravières de la Bassée, ont répondu et répondent parfois encore à des usages d'exploitation d'une ressource ayant des conséquences sur l'hydrodynamisme à la fois de surface et souterrain. La compréhension des interactions nappes-rivières est alors nécessaire pour évaluer les impacts de certains usages de la société sur la ressource en eau, comme le pompage pour l'eau potable, l'écrêtage des crues ou le soutien d'étiage.

Autre domaine traité depuis des années au PIREN-Seine, le suivi de la continuité sédimentaire s'avère nécessaire à la bonne compréhension du comportement naturel d'un cours d'eau en fonction de ses paramètres physiques, géologiques et hydrologiques. Cette connaissance peut ainsi permettre d'évaluer l'impact du démantèlement d'un ouvrage sur le milieu, et ainsi de participer à la mise en place de mesures de restauration adaptées à chaque milieu aquatique.

Les équipes du PIREN-Seine accompagnent ainsi certains travaux d'effacement de seuil, de démantèlement de barrage ou de renaturation des berges. Ce suivi, mené sur le temps long, permet de considérer les effets réels de ces travaux au regard de leurs effets attendus, et ainsi d'enrichir

toujours plus les connaissances en matière de restauration des milieux aquatiques. L'arasement progressif du barrage de la Pierre Glissotte, sur l'Yonne amont, a été suivi pendant plus de cinq ans par les équipes du programme, qui en analysent les effets sur l'hydromorphologie, la dynamique du transport sédimentaire et donc sur le temps nécessaire pour un retour à l'équilibre morphodynamique du milieu. D'autres travaux de réaménagement ont été étudiés sur divers cours d'eau franciliens, qu'ils soient très urbanisés comme l'Orge, ou en zone péri-urbaine comme la Mérantaise.

Mais les actions de restauration doivent aussi viser à renouveler et à restaurer la relation des humains à la nature. De nombreux travaux du PIREN-Seine ont justement montré qu'il ne fallait pas négliger la matérialité des paysages. Car celle-ci est au cœur des relations entre les sociétés et la rivière : elle les conditionne aussi bien qu'elle les révèle. Une des clefs d'appropriation des projets de restauration de cours d'eau en ville repose sur le volet paysager et esthétique.

À chaque milieu donné, la compréhension des mécanismes physiques, chimiques et sociétaux liés aux aménagements artificiels du corridor hydroécologique permet ainsi d'apporter une expertise spécifique précieuse aux gestionnaires de l'environnement pour des travaux de restauration.



On synthétise

Le PIREN-Seine a édité en 2019 un fascicule sur l'histoire des aménagements et modifications de la géomorphologie dans le bassin de la Seine, qui résume les derniers travaux du programme dans le domaine.

Disponible en téléchargement sur le site du PIREN-Seine :

https://www.piren-seine.fr/publications/fascicules/archiseine_une_approche_geohistorique_du_bassin_de_la_seine

https://piren-seine.fr/publications/fascicules/les_petites_rivieres_urbaines_environnement_evaluation_gestion_et



La construction de la qualité chimique de l'eau

Outre les aménagements physiques, l'une des principales conséquences de l'activité humaine sur l'eau est sa pollution chimique. Le dernier siècle fut particulièrement intense en création de nouvelles molécules de synthèse et en développement continu de nouveaux produits manufacturés, et le système d'évacuation des déchets par les eaux a eu pour effet d'amener ces éléments chimiques nouveaux dans l'environnement. De plus, l'augmentation graduelle de la population humaine, et sa concentration dans les pôles urbains ont grandement augmenté la quantité d'eau usée déversée dans l'environnement, obligeant à la construction de stations d'épuration et d'une politique de traitement « à la sortie des tuyaux » toujours plus performante, technologique et diversifiée. Mais du constat d'une pollution du milieu à la mise en place de mesures efficaces pour lutter contre celle-ci, les parcours techniques et légaux de la prise de décision et de son application diffèrent grandement d'une contamination à l'autre.

Si la chimie de l'eau est étudiée au PIREN-Seine depuis ses débuts en 1989, l'analyse des moyens de mesure et de la construction des normes de qualité chimique fait l'objet d'un travail de recherche plus récent. Car en se penchant sur les trajectoires historiques de la qualité de l'eau dans le bassin de la Seine, chercheurs et gestionnaires ont constaté que

si certains critères de la qualité de l'eau évoluaient bien au fur et à mesure des usages et des réglementations, comme les métaux ou les PCB, d'autres indicateurs ne réagissaient qu'après le passage d'un seuil, atteint après de nombreux efforts étalés sur plusieurs décennies. À titre d'exemple, les mesures pour essayer de maintenir un niveau d'oxygène dissous suffisant pour empêcher les épisodes réguliers de surmortalité piscicole ont été appliquées depuis les années 1970, mais il a fallu attendre jusqu'en 1995 pour que ces épisodes de mortalité piscicole cessent.

Étudiée ponctuellement depuis le début des années 2000 au PIREN-Seine, la construction de la qualité de l'eau fait l'objet de recherches approfondies depuis 2012 à travers le projet Makara, de l'Agence nationale de la recherche (ANR). Celui-ci visait à analyser la société face aux changements de qualité des eaux de surface depuis 1850. Cette analyse mena les équipes à s'interroger sur deux facteurs essentiels de la construction de la qualité de l'eau, à savoir les éléments amenant à l'établissement d'une norme de qualité, et sur les usages de l'eau nécessitant l'application de cette norme.

Un travail d'évaluation de la connaissance scientifique liée à tel ou tel paramètre physicochimique de l'eau fut ainsi mené, en parallèle d'une recherche historique sur les

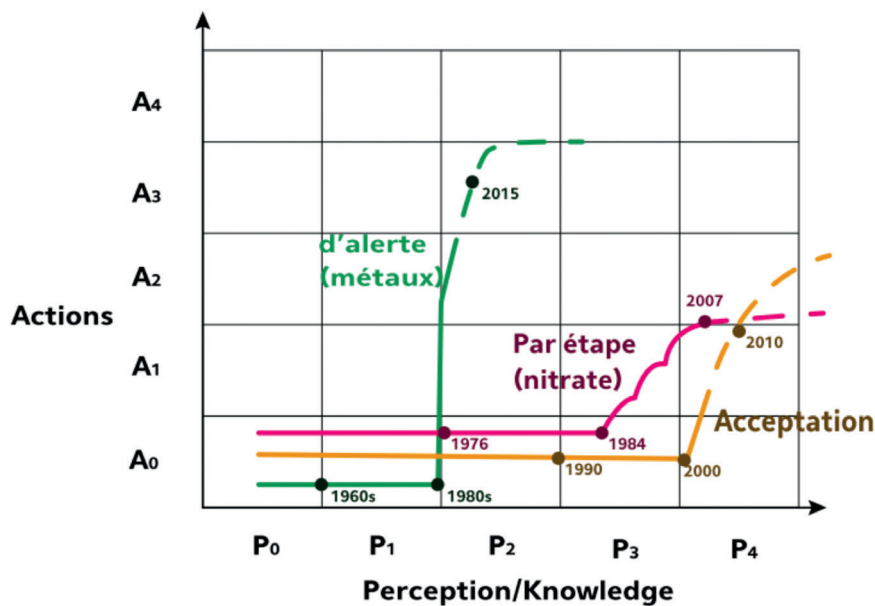


Figure 11 : Trajectoires de la société face à un problème de l'environnement. Perceptions/actions. Principales trajectoires sociales perception-action. A0 à A4 : formes d'action, P0 à P4 perception et connaissance des problèmes.



actions de réglementation passées et les usages urbains et ruraux de la société, afin de déterminer la trajectoire de la contamination et des mesures de qualité associées pour un grand nombre de polluants. Il en ressort que la connaissance scientifique d'une pollution ne suffit pas à actionner les leviers nécessaires à la limitation de celle-ci. La médiatisation, les préoccupations liées aux impacts immédiats sur la santé, ou la pression exercée par un usage de l'eau jugé comme prioritaire sont autant de paramètres qui influent sur la prise de décision politique et la mise en place d'une norme.

Ainsi, les paramètres liés à la baignabilité des cours d'eau n'avaient, jusqu'à récemment, pas besoin de mesures supplémentaires nécessitant d'améliorer la qualité de l'eau, la baignade en Seine étant un usage moins important que celui du transport fluvial, de l'agriculture ou du traitement des eaux usées. Mais la volonté de la population à vouloir se baigner en Seine, et surtout la perspective des épreuves en eaux libres des Jeux olympiques et paralympiques de

2024 ont agi comme un levier important sur la prise de décision par les pouvoirs publics, concernant les niveaux de bactéries indicatrices fécales ou la navigation.

Si aujourd'hui la qualité de l'eau s'est grandement améliorée, la question de la baignade ne s'arrête pas qu'aux enjeux sanitaires. En effet, pour que la baignade s'effectue sans risque, il est nécessaire d'adapter voire de modifier des infrastructures de gestion de l'eau et d'imaginer les futurs modes de gestion des sites de baignade. Se poser la question de la baignade en cœur de ville, c'est aussi se questionner sur les perceptions du public et les enjeux de la gestion des sites de baignade pour mieux anticiper les attentes et les éventuelles contraintes qui ne sont pas uniquement sanitaires. Il s'agit aussi de se questionner sur l'héritage de ces aménagements qui seront laissés aux Franciliens sur plusieurs sites de baignade en Marne et en Seine au-delà de l'échéance des JOP de 2024.

On synthétise



Le PIREN-Seine a édité en 2024 un fascicule sur la baignade en Seine et en Marne.

Disponible en téléchargement sur le site du PIREN-Seine :

https://www.piren-seine.fr/publications/fascicules/la_baignade_en_seine_et_en_marne



CHAPITRE 5



Des outils pour l'aide à la gestion

L'un des objectifs du PIREN-Seine est d'éclairer du mieux possible les gestionnaires du monde de l'eau dans leurs missions. Cela passe bien sûr par une meilleure compréhension du socio-hydrosystème Seine, du fonctionnement de ses différents compartiments, des interactions qu'ils ont entre eux et par la mise à disposition d'outils pour éclairer les décisions publiques. À ce titre, le couplage des différents modèles du programme permet justement de mieux

comprendre le socio-hydrosystème Seine, et d'explorer des scénarios de plus en plus complexes pour relever notamment les nouveaux défis posés par le changement climatique. Il s'agit aussi de mettre à disposition des données issues des résultats des modélisations qui peuvent aider les gestionnaires à aborder des problématiques à des échelles plus locales, notamment avec des outils de datavisualisation.

La chaîne de modélisation du continuum Homme-Terre-Mer

Depuis sa création en 1989, le PIREN-Seine s'est spécialisé dans la conception et le développement de différents modèles afin de mieux comprendre le fonctionnement du socio-écosystème du bassin de la Seine. S'intéressant à l'hydrologie, l'agronomie, la biologie ou encore la biogéochimie et l'hydroclimatologie, des outils spécifiques répondent historiquement, et de manière intégrée, à la diversité des compartiments étudiés et aux enjeux de gestion de l'eau qui y sont liés.

Cependant, lorsque les questionnements portent sur le fonctionnement global du bassin versant, il devient nécessaire de comprendre les mécanismes des différents processus à l'œuvre à cette échelle, et d'interpréter correctement leurs interrelations. Il s'agit aussi d'avoir une bonne estimation des flux - d'eau, de chaleur ou encore de contaminants - dans les trois dimensions de l'espace : longitudinalement de l'amont vers l'aval, verticalement entre les eaux de surface et les eaux souterraines et enfin latéralement aux zones ripariennes le long des cours d'eau. La dimension temporelle, de la haute fréquence au temps long, constitue une autre dimension que le PIREN-Seine a déjà explorée.

Pour autant, assurer un couplage, c'est-à-dire l'articulation et la compatibilité de ces modèles initialement pensés et conçus de façon indépendante, constitue un réel défi technique. En effet, certains de ces outils numériques ont besoin de données en entrée ou vont fournir des données en sortie qui ne seront pas intégrables par d'autres. Ainsi, un modèle de flux développé en amont du bassin dans un cadre de compréhension de l'apport des sols agricoles peut se retrouver incompatible avec un modèle de flux développé en aval pour répondre à des enjeux d'assainissement.

Ce défi lancé dès les premières phases du PIREN-Seine a été relevé au début de la phase 8 du PIREN-Seine par les scientifiques, qui ont réussi à mettre en place une chaîne de modélisation sur tout le continuum Homme-Terre-Mer. Par ailleurs, elle permet de mutualiser rapidement des outils initialement développés pour assurer une description fine et spécifique du comportement d'une partie d'un système, tout en garantissant une grande souplesse dans la représentation de ces processus. Chaque module de cette chaîne peut alors être activé ou désactivé selon les questions posées.

Ainsi, un premier couplage entre d'une part les modèles STICS, qui permet de simuler les liens sol-atmosphère-culture, et d'autre part le modèle du fonctionnement biogéochimique Riverstrahler, s'est effectué via un ancien modèle hydrologique du programme, MODCOU, qui est aujourd'hui intégré dans CaWaQS. Grâce à ces emboitements, le PIREN-Seine a ainsi pu modéliser en 2018 la cascade de l'azote dans le bassin, depuis les sols agricoles jusqu'à l'exutoire de celui-ci, en passant par les aquifères. En 2022, le programme est ainsi en mesure de présenter une chaîne de modèles STICS-CaWaQS/PyNuts-Riverstrahler, et de proposer des simulations des flux hydrologiques et biogéochimiques à l'échelle du bassin Seine-Normandie.

Cette plateforme de modélisation constitue un outil majeur à destination des gestionnaires de l'eau et des territoires, car elle offre une vision intégrée des processus à l'œuvre dans le bassin. Cet outil est d'autant plus important, qu'il est capable d'offrir des reconstitutions de trajectoires historiques ou encore de réaliser des simulations, selon différents scénarios climatiques ou sociologiques, de la ressource en eau.

On synthétise

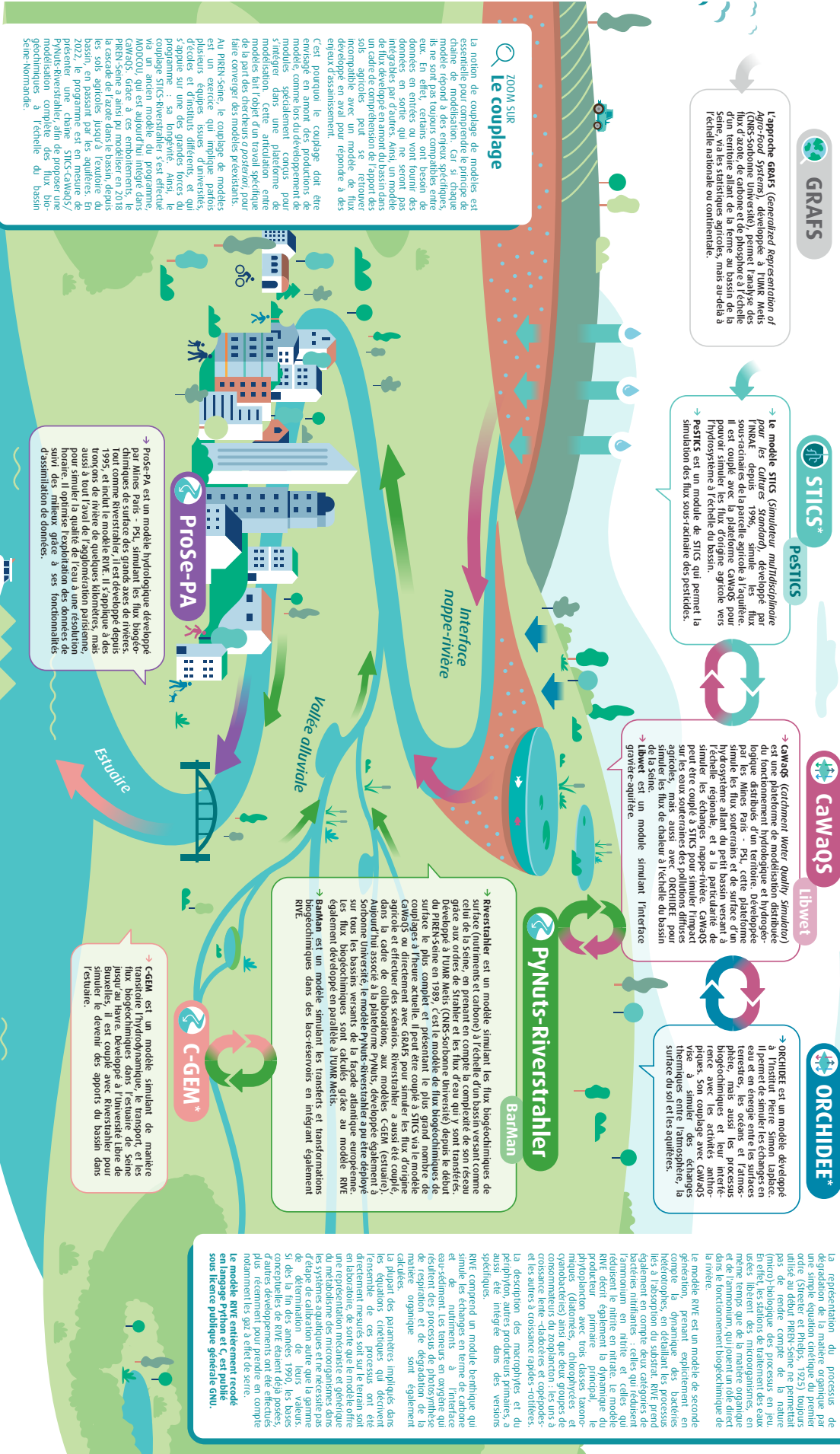


Le PIREN-Seine a publié en 2022 une fiche 4 pages sur la chaîne de modélisation du continuum Homme-Terre-Mer. Elle présente les grands modèles utilisés dedans ainsi que leurs interactions.

Disponible en téléchargement sur le site du PIREN-Seine :

https://piren-seine.fr/publications/fiches_4_pages/la_chaine_de_modelisation_sur_le_continuum_seine

La chaîne de modélisation sur le continuum seine



L'approche GRAFS (Generalized Representation of Agro-food Systems), développée à l'UMR Meis (CNRS-Sorbonne Université), permet l'analyse des flux d'azote, de carbone et de phosphore à l'échelle d'un territoire allant de la ferme au bassin de la Seine-Normandie, mais aussi de la échelle nationale ou continentale.

GRAFS

Le modèle **STICS (Simulateur multidisciplinaire pour les Cultures Standard)**, développé par l'INRAE depuis 1996, simule les flux sous-solaires de la parcelle agricole à l'aquifère. Il permet de simuler les flux d'origine agricole pour l'hydrosystème à l'échelle du bassin.

PESTICIS est un module de STICS qui permet la simulation des flux sous-solaires des pesticides.

STICS* PESTICIS

CaWaqs (catchment Water quality simulator) est une plateforme de modélisation distribuée du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique d'un territoire. Développée par l'INRAE, elle simule les flux souterrains et de surface d'un hydrosystème allant du petit bassin versant à l'échelle régionale, et à la particularité de simuler les échanges nappe-rivière. CaWaqs peut être couplé à STICS pour simuler l'impact sur les eaux souterraines des pesticides. Il permet de simuler les flux de chaleur à l'échelle du bassin de la Seine.

libwet est un module simulant l'interface gravier-aquifère.

CaWaqs libwet

ORCHIDEE* est un modèle développé par l'Institut Pierre Simon Laplace. Il permet de simuler les échanges en eau et en énergie entre les surfaces terrestres, les océans et l'atmosphère, ainsi que les processus biogéochimiques. Les processus biogéochimiques, les activités anthropiques, son couplage avec CaWaqs vise à simuler des échanges thermiques entre l'atmosphère, la surface du sol et les aquifères.

ORCHIDEE*

PyNuts-Riverstrahler (Barman) est un modèle simulant les flux biogéochimiques de surface (nutriments et carbone) à l'échelle d'un bassin versant comme gage aux ordres de Strahler et les flux d'eau qui y sont transférés. Développé à l'UMR Meis (CNRS-Sorbonne Université) depuis le début du PIREN-Seine en 1989, c'est le modèle de flux biogéochimiques de surface le plus complet et présentant le plus grand nombre de couplages à l'heure actuelle. Il peut être couplé à STICS via le module **libwet** et efficacement avec **libwet** pour simuler les flux de chaleur et d'azote. Le modèle PyNuts-Riverstrahler a été développé dans le cadre de collaborations, aux modèles C-GEN (Estuaries), Aujourd'hui associé à la plateforme PyNuts, développée également à Sorbonne Université, le modèle PyNuts-Riverstrahler a pu être déployé sur tous les bassins versants de la façade atlantique européenne. Les flux biogéochimiques sont calculés grâce au modèle RIVE également développé en parallèle à l'UMR Meis.

Riverstrahler est un modèle simulant les flux biogéochimiques de surface (nutriments et carbone) à l'échelle d'un bassin versant comme gage aux ordres de Strahler et les flux d'eau qui y sont transférés. Développé à l'UMR Meis (CNRS-Sorbonne Université) depuis le début du PIREN-Seine en 1989, c'est le modèle de flux biogéochimiques de surface le plus complet et présentant le plus grand nombre de couplages à l'heure actuelle. Il peut être couplé à STICS via le module **libwet** et efficacement avec **libwet** pour simuler les flux de chaleur et d'azote. Le modèle Riverstrahler a été développé dans le cadre de collaborations, aux modèles C-GEN (Estuaries), Aujourd'hui associé à la plateforme PyNuts, développée également à Sorbonne Université, le modèle PyNuts-Riverstrahler a pu être déployé sur tous les bassins versants de la façade atlantique européenne. Les flux biogéochimiques sont calculés grâce au modèle RIVE également développé en parallèle à l'UMR Meis.

C-GEM* est un modèle simulant de manière transdisciplinaire l'hydrodynamique, le transport, et les processus biogéochimiques dans les zones littorales. Développé à l'Université Libre de Bruxelles, il est couplé avec Riverstrahler pour simuler le devenir des apports du bassin dans l'estuaire.

C-GEM*

PROSE-PA est un modèle hydrologique développé par Mines Paris - PSY, simulant les flux biogéochimiques de surface des grands axes de rivières. Développé à l'UMR Meis (CNRS-Sorbonne Université) depuis 1995, ce module simule les flux biogéochimiques de surface de quelques kilomètres, mais aussi à tout l'échelle de l'agglomération parisienne, pour simuler la qualité de l'eau à une résolution horaire. Il optimise l'exploitation des données de suivi des nappes grâce à ses fonctionnalités de visualisation de données.

PROSE-PA

ZOOM SUR Le couplage

La notion de couplage de modèles est essentielle pour comprendre le principe de la chaîne de modélisation. Les modèles ne sont pas toujours compatibles entre eux. En effet, certains ont besoin de données en entrée qui ne sont pas renseignées par d'autres. Ainsi, un modèle de flux biogéochimiques nécessite un cadre de compréhension de l'apport des sols agricoles, peut se retrouver incompréhensible avec un modèle de flux de chaleur, et ainsi de suite.

C'est pourquoi le couplage doit être envisagé en amont des productions de données. Les modèles sont développés, conçus, testés, validés, et finalement couplés. Ce processus de modélisation, cette articulation entre modèles fait l'objet d'un travail spécifique de la part des chercheurs *opérateur*, pour faire converger des modèles pré-existants.

Au PIREN-Seine, le couplage de modèles est un exercice qui implique, parfois de manière transversale, des équipes de chercheurs et d'industriels différents, et qui s'appuie sur une des grandes forces du programme : sa longévité. Ainsi, le couplage STICS-Riverstrahler s'est effectué via un ancien modèle du programme, **PROSE-PA**, développé par Mines Paris - PSY. Le couplage CaWaqs libwet a été développé par l'UMR Meis (CNRS-Sorbonne Université) depuis 1995, ce qui a permis de coupler les flux biogéochimiques de surface de quelques kilomètres, mais aussi à tout l'échelle de l'agglomération parisienne, pour simuler la qualité de l'eau à une résolution horaire. Il optimise l'exploitation des données de suivi des nappes grâce à ses fonctionnalités de visualisation de données.

ZOOM SUR Le modèle RIVE

La représentation du processus de dégradation de la matière organique par une simple équation cinétique du premier ordre (Streeter et Phelps, 1925) toujours utilisée au début du PIREN-Seine ne permettait pas de simuler les processus biogéochimiques (microbiologiques) des processus en jeu. En effet, les sélections de traitement des eaux usées libèrent des microorganismes, en même temps que de la matière organique et de l'azote, qui jouent un rôle direct dans le processus de dégradation de la matière organique.

Le modèle RIVE est un modèle de seconde génération prenant explicitement en compte la dynamique des bactéries hétérotrophes, en détaillant les processus liés à l'absorption du substrat. RIVE prend également en compte deux catégories de bactéries méthaniques : celles qui réalisent le métabolisme méthanique (réduisant le nitrate en nitrite en nitrate), le phytoplancton avec trois classes taxonomiques (diatomées, cyanobactéries et chlorococcoides) ainsi qu'apportant des produits de croissance lente-cladocères et copépodes et les autres à croissance rapide-crotillères.

La description des macrophytes, et du phyton, autres producteurs primaires, a aussi été intégrée dans des versions précédentes.

RIVE comprend un module biochimique qui simule les échanges en terme de carbone et de nutriments à l'interface eau-sédiments. Ce module permet de simuler les processus de dénitrification, de respiration et de dégradation de la matière organique, qui sont également calculés.

La plupart des paramètres impliqués dans les équations cinétiques qui décrivent les processus biogéochimiques sont mesurés soit sur le terrain, soit en laboratoire, de sorte que le modèle offre une représentation mécaniste et générique du métabolisme des microorganismes dans les systèmes aquatiques et ne nécessite pas de calibration. Les paramètres sont donc déterminés de manière indépendante. Si dès la fin des années 1990, les bases conceptuelles de RIVE étaient déjà posées, d'autres développements ont été effectués plus récemment pour prendre en compte notamment les gaz à effet de serre.

Le modèle RIVE entretient un record de longévité et est toujours utilisé dans le cadre de la gestion de l'estuaire de la Seine. Il est couplé avec Riverstrahler pour simuler le devenir des apports du bassin dans l'estuaire.

* Les modèles STICS, ORCHIDEE et C-GEN ont été utilisés et enrichis dans le cadre de divers projets sur la Seine, mais n'ont pas été développés dans le cadre du PIREN-Seine.

Figure 12 : La chaîne de modélisation du PIREN-Seine, une avancée majeure de la phase 8 du programme.

La prospective et les futurs du bassin



La gestion de la ressource en eau du bassin de la Seine nécessite de pouvoir se projeter à court, moyen et long terme, et les perspectives liées aux enjeux socio-écologiques du XXI^e siècle sont des éléments clés à prendre en compte pour adopter une gestion durable de l'eau et des sols. C'est pourquoi le PIREN-Seine s'est très vite saisi de la question du changement climatique pour construire dès le début des années 2000 des scénarios basés sur les prévisions du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), et déclinés quantitativement par MODCOU, puis aujourd'hui CaWaQS.

Anticiper les effets du changement climatique

Lors de la phase 8 du programme, les scientifiques se sont appuyés sur les résultats des modèles climatiques globaux de dernière génération, issus du dernier rapport du GIEC. Afin d'imaginer un ensemble des possibles en fin et milieu de XXI^e siècle, et donc d'étudier la vulnérabilité du bassin selon différents types d'évolutions, les scientifiques se sont concentrés sur la simulation de trois scénarios principaux des évolutions des forçages anthropiques à l'échelle mondiale, nommés *Shared Socio-economic Pathways* ou SSP.

Ces trois scénarios sont bien entendu très contrastés. Le premier (SSP1-2.6) présente des actions très favorables pour l'environnement, un fort déploiement des énergies renouvelables et un réchauffement limité. Un deuxième (SSP2-4.5) qui suit plutôt les tendances actuelles en matière de politiques environnementales. Et enfin, un dernier (SSP5-8.5) reposant sur les énergies fossiles, sans politiques volontaristes et donc avec un réchauffement global marqué. Dans un second temps, les scientifiques ont sélectionné quatre modèles climatiques contrastés (certains simulant plutôt des conditions humides et d'autres plutôt sèches), adaptés à la modélisation du climat pour le bassin de la Seine.

Les trajectoires hydrologiques ainsi obtenues montrent que sans réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre, le bassin de la Seine subirait un fort réchauffement, quel que soit le modèle ou le scénario considéré. De la même manière, les précipitations augmenteraient en hiver et diminueraient en été, avec en prime une évapotranspiration augmentée en hiver et au printemps, mais diminuée en été dans la majorité des simulations.

Les changements dans les débits annuels restent très incertains, avec des variations importantes entre les trajectoires, notamment pour le scénario le moins favorable

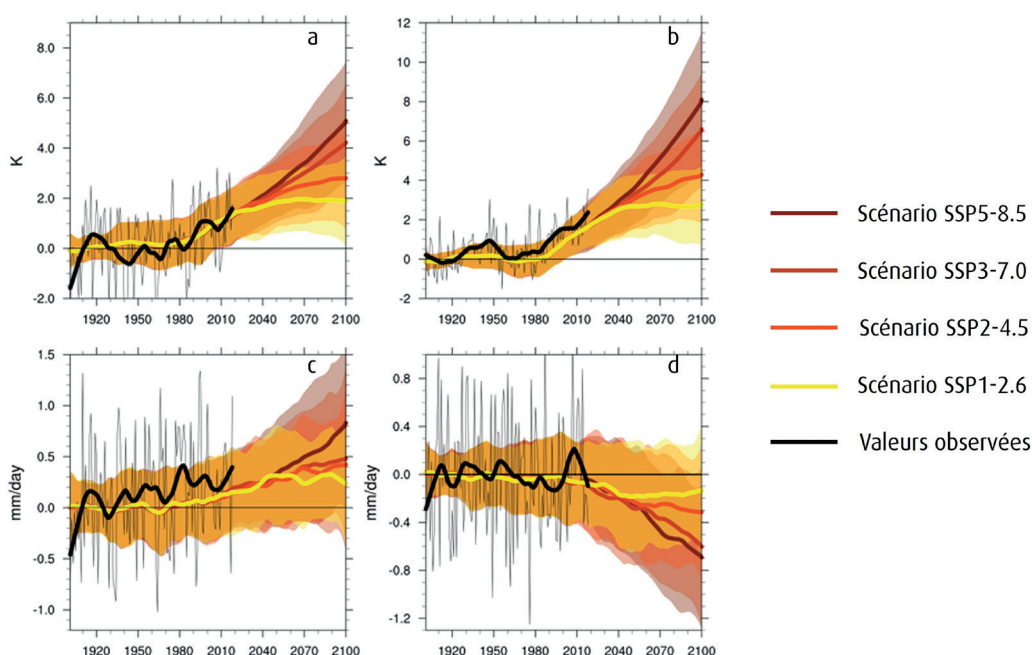


Figure 13 : Evolution (a, b) de la température (°C) et (c, d) des précipitations (mm/jour) sur le bassin de la Seine entre 1920 et 2100 dans les observations (CRU TS4) et pour 4 scénarios d'émission de gaz à effet de serre : du plus chaud au plus froid sur (a) : SSP5-8.5, SSP3-7.0, SSP2-4.5, SSP1-2.6. (a,c) Hiver; (b,d) Été.

(SSP5-8.5). Par ailleurs, des différences spatiales marquées sont observées, influencées par la contribution des aquifères à ces mêmes débits. Pour autant, les trajectoires de conditions sèches montrent une augmentation des sécheresses hydrologiques en fin de XXI^e siècle, tandis que les trajectoires de conditions humides pourraient voir une hausse des débits extrêmes, posant un double défi pour l'adaptation.

Des événements extrêmes plus fréquents et plus intenses

Par ailleurs, la fréquence des événements extrêmes comme les sécheresses pourrait augmenter, surtout dans le cas des scénarios les plus sévères, pouvant atteindre cent jours par an d'ici la fin du siècle. De nouvelles méthodes de calcul offrent une meilleure confiance dans l'évolution des débits extrêmes, révélant des augmentations potentielles des crues annuelles maximales à Paris. Même avec des trajectoires en conditions sèches, des crues plus intenses sont possibles.

Les impacts hydrologiques varient selon les scénarios d'émission, et semblent moins sévères avec des politiques climatiques ambitieuses. Les résultats soulignent l'importance de ces politiques pour éviter des adaptations dispendieuses et, à terme, douloureuses. Les trajectoires hydrologiques étudiées ne représentent pas tous les changements possibles, mais sont compatibles avec les projections climatiques et hydrologiques antérieures. Ces trajectoires peuvent aider à tester la résilience des systèmes hydro-socio-économiques du bassin de la Seine et les politiques d'adaptation pour divers futurs possibles, malgré les incertitudes existantes.

Des scénarios agri-urbains plus sobres

Du mode d'organisation de notre système agroalimentaire à la production de produits polluants domestiques et industriels, jusqu'à la stratégie adoptée pour notre système d'épuration des eaux usées, nombre de nos usages de l'eau entraînent des pressions sur le milieu, dont les conséquences à long terme sont encore mal connues.

Des équipes scientifiques du PIREN-Seine, spécialisées dans divers domaines, ont co-construit, avec les partenaires du programme, divers scénarios sur le système agricole du bassin de la Seine. Ces derniers sont basés sur les modèles hydroécologiques et agronomiques développés par le programme, et leur exploration a permis de croiser des visions diverses des futurs possibles du bassin de la Seine à des horizons de moyen ou de long terme (2050-2100).

Par exemple, il a été possible d'imaginer un scénario sur la poursuite du système agri-alimentaire actuel, qui montre des conséquences préoccupantes à l'horizon 2050. En premier lieu, les masses d'eau souterraines voient leur concentration en nitrate augmenter, avec une dégradation de la qualité des eaux de surface en aval des métropoles du fait d'une plus faible capacité de dilution. À cela, une déconnexion physique et sociale entre zone urbaine et zone rurale devrait s'intensifier, et le transport des matières, y compris des nutriments, augmenter tant en volume qu'en distance.

Partant de ces projections dommageables pour l'ensemble du socio-hydrosystème, et afin d'aider à la prise de décision, ces équipes ont également proposé des scénarios d'amélioration allant vers une plus grande sobriété du système agri-alimentaire. C'est le cas notamment du scénario «agro-écologique» (autonome, reconnecté et demitarien) qui propose une agriculture tournée vers plus de circularité et plus de bio. Ce scénario a été décliné pour les 30 % de la SAU dans les aires protégées et les parcs naturels régionaux. La contamination nitrique et en pesticides des nappes diminuerait significativement. L'adoption d'un régime demitarien, qui divise par deux l'ingestion de protéines d'origine animale, tout en reconnectant les cultures végétales et l'élevage participerait ainsi à une réduction de notre pression sur la ressource en eau. La consommation prioritaire de denrées locales et de saison permettrait aussi de réduire l'énergie dépensée dans le transport des marchandises, et reconnecter socialement et alimentaires les villes à leurs zones d'approvisionnement historiques. Un retour des excréta humains des zones urbaines vers les parcelles agricoles aux alentours permettrait de sortir de la politique du tout à la rivière, et de les substituer le recyclage aux engrais de synthèse.

On synthétise



Le PIREN-Seine a édité en 2024 un fascicule sur les trajectoires hydrologiques du bassin de la Seine.

Disponible en téléchargement sur le site du PIREN-Seine :
<https://piren-seine.fr/publications/fascicules>



Enfin, en fin de phase 8, un nouveau scénario agri-alimentaire de sobriété radicale a été exploré en comparaison du scénario agro-écologique, en poussant la réflexion au-delà du seul système agricole pour réfléchir aux leviers sociaux et politiques nécessaires pour leur réalisation. Ainsi, il aborde un changement du système sociopolitique, et plus précisément le rôle des pouvoirs publics et la manière dont les décisions collectives sont prises, ainsi que les aspects démographiques de l'ensemble du bassin de la Seine et sur l'organisation spatiale de la population. Et enfin, il interroge les rapports au vivant et à l'hyper-technicité.

Si aujourd'hui ces scénarios, non prescriptifs, proposent des chemins divers qui peuvent encore parfois manquer

de réalisme, mais alimentent les réflexions et débats, les équipes travaillent à de nouveaux scénarios pour construire une vision territoriale et intégrée des futurs du bassin de la Seine, en prenant en compte les nouveaux comportements des individus et les ambitions des pouvoirs publics.

Dans les futures recherches, il est prévu d'inclure autant que possible les contaminants issus de l'industrie et des usages domestiques à ces nouveaux scénarios. Confrontés les uns aux autres, ces derniers devraient faire émerger des visions claires et cohérentes des futurs possibles, en prenant en compte les aspects agricoles, urbains, industriels, sociaux et politiques.



On synthétise



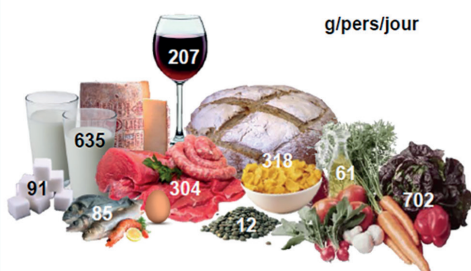
En 2024, le PIREN-Seine a édité 14 fiches décrivant minutieusement les deux scénarios de rupture « Les Villes en leur Bassin » et « Post Métropolisation » qui explorent des trajectoires de transition visant à limiter le dépassement de l'ensemble des limites planétaires.

Disponible en téléchargement sur le site du PIREN-Seine :

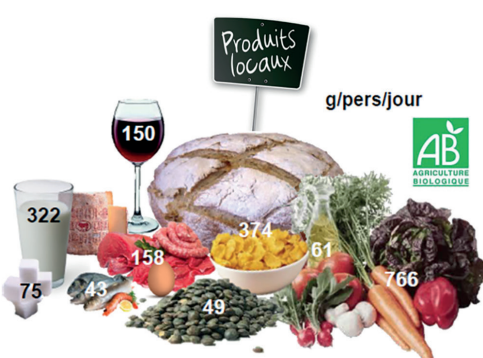
https://piren-seine.fr/rapports/autres_rapports_et_etudes/deux_scenarios_agri_alimentaires_et_urbains_sobres_pour_le



Exemple de régime alimentaire actuel



Transposition en régime alimentaire demitarien



Focus sur : LE RÉGIME DEMITARIEN

Le régime demitarien est un régime alimentaire proposé par certains chercheurs à travers le monde pour réduire l'impact du système agricole sur l'environnement, reconnecter l'élevage aux cultures végétales et favoriser une alimentation locale pérenne tant sur le plan agronomique qu'économique. Appliqué au bassin de la Seine, il comporte une diminution par deux de la consommation de denrées d'origine animale, compensée par une augmentation de la consommation de protéines végétales cultivables localement, comme les lentilles.

Présenté ainsi, le changement alimentaire apparaît comme un changement alimentaire moins contraignant pour la population du bassin.

Données et science ouverte

Depuis 35 ans, les équipes de recherche du programme produisent des données à travers des campagnes de terrain, des expériences en laboratoire ou encore grâce à ses outils de modélisation. Cette collecte systématique et rigoureuse de données de haute qualité recouvre un grand nombre d'aspects environnementaux tels que la qualité de l'eau, les sédiments, la biodiversité et les flux de polluants. Pour organiser et rendre ces données accessibles, le PIREN-Seine utilise le géocatalogue de la Zone Atelier Seine (ZA Seine). Il s'agit d'une plateforme numérique qui centralise et répertorie l'ensemble des données environnementales collectées dans le cadre du programme. Cet outil sert de point d'entrée aux chercheurs, gestionnaires et décideurs pour accéder facilement aux bases de données. Ces données disponibles incluent des informations sur la qualité des eaux, les caractéristiques des sols, la biodiversité aquatique, ainsi que les sources et flux de polluants. La plateforme répertorie également les codes source des outils de modélisation.

A travers cette plateforme, le PIREN-Seine adhère aux principes FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) qui proposent des lignes directrices pour rendre les données et les codes sources faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables.

Au-delà de sa politique de données, le PIREN-Seine s'inscrit dans une démarche de Science Ouverte. Celle-ci vise à rendre la recherche scientifique plus transparente, accessible et collaborative. Elle implique la mise à disposition libre et gratuite des données, des méthodes et des résultats de recherche pour la communauté scientifique

et le grand public. Au PIREN-Seine, cela se traduit par la publication en accès libre des rapports de recherche, des articles scientifiques, des jeux de données et des codes source.

La mise en œuvre de la Science Ouverte au PIREN-Seine facilite la réutilisation des données par d'autres chercheurs et encourage la collaboration interdisciplinaire. Elle permet également une meilleure transparence et une plus grande confiance du public dans les résultats de la recherche. Ainsi, les équipes de recherche publient chaque année un rapport d'activité détaillé, qui compile leurs travaux et leurs résultats. Ce sont entre 30 et 40 rapports de recherche par an qui sont édités et mis en ligne sur le site du PIREN-Seine, en téléchargement libre et gratuit.

Cette diffusion des savoirs scientifiques a également pu s'illustrer à l'occasion des 30 ans du PIREN-Seine avec la publication d'un ouvrage scientifique de premier plan, afin de proposer une vision actualisée et globale de l'état des connaissances sur le bassin de la Seine : *The Seine River Basin*. Sorti dans une revue de référence dans le monde scientifique, *Handbook of Environmental Chemistry*, le PIREN-Seine a tenu à publier ses travaux sous la licence Creative Commons Attribution 4.0, qui permet la diffusion, l'utilisation et le partage libre de son contenu, sous réserve d'en citer les auteurs et la source. Ils sont donc disponibles en ligne sur le site de Springer, ou en téléchargement libre et gratuit (<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-54260-3>).

Focus sur : LA DÉMARCHE FAIR



Elle désigne une démarche de partage et d'ouverture des données, promue dans le cadre de la science ouverte. Elle regroupe un ensemble de principes à suivre afin de rendre les données :

- Faciles à trouver grâce à un point d'entrée pérenne et à des métadonnées décrivant de manière détaillée les données,
- Accessibles grâce à des méthodes standards de communication et associées à des licences d'utilisation claires,
- Interopérables notamment grâce à l'utilisation de formats de données ouverts,
- Réutilisables grâce à la richesse des métadonnées associées aux données informant, entre autres, sur leur contenu précis, leur provenance, les méthodes d'acquisition.

En 2024, 10 volumes de synthèse retraçant l'ensemble des travaux menés lors de la phase 8 du programme sont publiés sur son site internet. Ces rapports de fin de phase représentent de véritables ouvrages scientifiques de premier plan, qui permettent d'inscrire les recherches du PIREN-Seine dans le temps long, et de servir de référence pour les années à venir.

Enfin, dans le but de rendre accessibles les résultats de modélisation issus du programme, le PIREN-Seine se lance dans un projet de datavisualisation pour sa phase 9. L'objectif est de construire avec les partenaires un outil web permettant la visualisation interactive des données de simulation produites par les modèles pyNuts-Riverstrahler et CaWaQS. Cette interface permettra d'explorer, de choisir et de télécharger les données de modélisation et facilitera de fait leur réutilisation.



On synthétise



À la suite d'un atelier de co-réflexion consacré aux données et aux métadonnées du PIREN-Seine, le programme a édité en 2022 un document synthétisant les échanges et discussions ayant animé cette rencontre entre chercheurs et gestionnaires de l'eau.

Disponible en téléchargement sur le site du PIREN-Seine :

https://piren-seine.fr/rapports/autres_rapports_et_etudes/livret_datelier_rendre_accessiblees_les_donnees_du_piren_seine



Conclusion

Le PIREN-Seine fête en 2024 ses trente-cinq ans, une exceptionnelle longévité qui repose sur une confiance dans le long terme et une co-construction des actions de recherche avec des partenaires incontournables de la gestion de l'eau sur le bassin de la Seine. Si cet ouvrage a pu laisser entrevoir l'étendue et la profondeur des thématiques traitées au sein du programme, il ne peut évidemment à lui seul refléter le travail accompli à ce jour par les scientifiques. Les nombreuses thématiques de recherches menés sur les contaminants, la matière organique, les interactions nappes-rivières, la gouvernance de l'eau, etc. et celles à venir en phase 9 comme les filières du bassin, l'exposome, les aléas et les extrêmes climatiques, etc. pourraient chacune faire l'objet d'un fascicule. C'est pourquoi le PIREN-Seine dispose de nombreux canaux de diffusion et d'échanges, pour transférer de manière plus pertinente les connaissances vers un public toujours plus large.

Les ateliers de co-réflexion

Si les partenaires du PIREN-Seine participent chaque année au comité de coordination afin de discuter des actions de recherche dans le cadre du programme pluriannuel, ils sont également impliqués dans la recherche elle-même à travers les ateliers de co-réflexion. Ces ateliers, qui se tiennent deux à trois fois par an, sont organisés autour de thématiques précises, afin de permettre l'échange, les discussions, et comme leur nom l'indique, la réflexion sur un domaine ou un ensemble d'actions définies. Depuis le début de la phase VII en 2015, 4 ateliers ayant pour thématique la prospective, les réseaux de mesure, la scénarisation et la matière organique ont eu lieu, ainsi que 3 journées de terrain sur les sites de l'Orge, de l'Orgeval et de la Bassée. Occasion exceptionnelle pour les partenaires d'approfondir les sujets techniques, de formuler des propositions précises ou d'ouvrir de nouvelles perspectives

de travail, ces ateliers sont une des pierres angulaires du transfert et de l'échange des savoirs au PIREN-Seine.

Des productions de plus en plus diversifiées

Pour toucher un public toujours plus large et proposer des documents et outils adaptés à chaque interlocuteur, la cellule de transfert des connaissances édite de nombreux documents aux formats divers. La poursuite de la collection des Fascicules du PIREN-Seine et le lancement des fiches 4 pages en 2017 ont vu naître une nouvelle forme de valorisation des connaissances générées par le programme : si le fascicule thématique demeure le document de diffusion le plus complet vers le public opérationnel et gestionnaire de l'eau, les fiches permettent de faire remonter des actions emblématiques ou des thématiques

transversales du programme vers des milieux plus éloignés des professionnels de l'eau. Document partiellement vulgarisé, la fiche permet ainsi aux journalistes, aux élus ou aux professionnels non spécialistes de découvrir un domaine de recherche du PIREN-Seine et ses résultats les plus récents en la matière.

La production de posters grand public a été lancée en 2018, un format qui permet une diffusion large des connaissances du PIREN-Seine et de faciliter les partenariats avec d'autres structures qui favorisent la médiation scientifique, telles que l'Union des fédérations de pêche du bassin Seine-Normandie (UFBSN), ou le programme Optimisation des cycles Carbone, Azote et Phosphore en ville (OCAPI). Adressés aux associations locales, aux personnels enseignants ou aux particuliers, ces posters abordent de manière graphique et simplifiée des thématiques fondamentales dans la recherche scientifique sur l'eau et l'environnement du bassin de la Seine. Cette collection pourra être enrichie grâce aux derniers résultats du programme. Ce format rencontre un fort succès auprès du grand public.

En 2022, le programme a lancé un nouveau format, 100 % numérique. Les « fiches outils » se veulent une présentation des outils de modélisation et méthodologiques développés par les scientifiques du PIREN-Seine. Contrairement aux autres productions, elles s'adressent en priorité aux équipes techniques des gestionnaires de l'eau. Non vulgarisé, ce document permet de renforcer le lien entre le monde de la recherche et les ingénieurs de terrain, en aidant ces derniers à s'approprier de puissants outils pour la compréhension du socio-écosystème Seine.

Un colloque annuel ouvert à tous

Si l'on dit souvent qu'un bon dessin vaut parfois mieux qu'un long discours, aucun document ne remplacera jamais l'échange direct dans sa capacité à transférer les savoirs, à enrichir le champ de la compréhension des processus naturels, et à créer de nouvelles connaissances issues du partage des expériences et des points de vue. Le PIREN-Seine organise donc chaque année un colloque gratuit et ouvert à toutes et à tous, dans lequel les chercheurs viennent d'une part présenter leurs travaux et leurs résultats, et d'autre part échanger avec le public dans des moments de discussion et de débats. Souvent préparés en adéquation avec l'actualité environnementale et articulés autour de thématiques porteuses d'enjeux forts de gestion de l'eau, ces événements annuels sont toujours le théâtre d'échanges productifs, et animent la vie du programme tout en l'ancrant dans les questions concrètes

qui émergent de la société civile. Enfin, chaque colloque fait, depuis 2016, l'objet d'une restitution sur le site du programme, et les supports de présentation et les résumés des chercheurs y sont également disponibles en libre accès. Depuis 2021, le colloque est également retransmis en direct sur la chaîne YouTube du programme.

La journée scientifique, un rendez-vous d'expertise

Lancée à la fin de l'année 2020, la Journée scientifique de PIREN-Seine se veut le pendant événementiel des « fiches outils ». Cette journée, dont les présentations sont beaucoup plus techniques que celles du colloque annuel, poursuit plusieurs objectifs : faire le point sur un certain nombre d'actions de recherche, présenter des méthodes et outils structurants, mais aussi, et surtout, mettre à l'honneur les jeunes chercheurs du programme, en mettant en avant les travaux, de master, de thèses et de postdocs. Initialement en version webconférence, elle est depuis 2022 au format hybride grâce à une mini-régie portable mise au point par la cellule de transfert de connaissance. Ce nouvel outil permet de faire une retransmission et une réalisation en direct de l'évènement afin que le savoir généré par le PIREN-Seine soit le plus largement diffusé.

Aller plus loin sur le web

Depuis 2017, le PIREN-Seine s'est donné pour ambition d'accroître sa présence en ligne. Cette visibilité passe par la création d'un nouveau site (www.piren-seine.fr), la valorisation des documents produits via différents canaux, l'entretien d'une bibliographie scientifique riche en ligne (<https://www.zotero.org/groups/4392851/piren-seine/library>) et le relai des informations et actualités médiatiques en lien avec le programme. Véritable plateforme-ressource du PIREN-Seine, l'ensemble des documents - rapports, fascicules, et fiches - y sont publiés, ainsi que les annonces des événements tels que le colloque annuel. Par ailleurs, tous les rapports de synthèses et annuels ont été DOIés afin de valoriser les travaux des chercheurs et chercheuses en leur donnant une véritable identité numérique.

Progressivement, d'autres outils ont fait leur entrée. Ainsi une médiathèque du programme a vu le jour en 2017, afin de compiler les photos et vidéos du programme (<https://media.piren-seine.fr/>), cumulant plus de 4,4 millions de vues en 2024. En 2021, le programme se dote d'une chaîne YouTube, sur laquelle sont diffusés en direct les colloques et les Journées scientifiques. Un chapitrage par session, ainsi qu'un résumé de cette dernière dans

la description des vidéos permettent aux personnes intéressées de rapidement retrouver l'information voulue.

Une présence de plus en plus forte dans les territoires

Emanant d'une demande des partenaires au lancement de la phase 8, la cellule de transfert des connaissances élargit alors ses missions de diffusion des connaissances vers les acteurs du bassin de la Seine, en intervenant directement dans des événements, ateliers, colloques et autres rencontres organisés par diverses structures. C'est ainsi qu'une présentation faisant la synthèse des travaux des prospectives de la ressource en eau, de celles sur les futurs de l'agglomération parisienne et ceux sur les modèles agri-alimentaires voient le jour. Les sollicitations allant croissant, de nouvelles présentations sur d'autres thématiques sont en cours de conception pour répondre du mieux possible aux demandes des acteurs du bassin sur la transmission des savoirs.

Cette présence du transfert des connaissances a également pris la forme d'un collectif entre des acteurs locaux et les chercheurs et chercheuses du PIREN-Seine. Ce collectif « acteurs-chercheurs » sur la Bassée, lancé en 2021, a permis pour la première fois, la tenue d'un atelier de co-réflexion directement sur un territoire concerné, en intégrant des acteurs du territoire et impliquant notamment les membres de la CLE du SAGE Bassée-Voulzie. L'ambition du collectif étant de développer dans des groupes de travail, animés par un binôme associant chercheur et acteur, des actions permettant de valoriser les travaux des chercheurs sur la plaine alluviale de la Bassée. Mais aussi, et surtout, de participer à un vaste projet de territoire autour de la ressource en eau.

Enfin, lors de la deuxième partie de la phase 8, le PIREN-Seine s'est lancé un nouveau défi : intervenir auprès des publics scolaires pour aborder les questions autour de la ressource en eau. Cette action s'est traduite par la participation à un cycle de conférences à destination des élèves des lycées écoresponsables, mais surtout à un projet pédagogique de deux ans sur l'eau avec la DRIEAT et les trois académies d'Île-de-France (Créteil, Paris et Versailles). Dans le cadre de ce dernier, le programme a coconstruit un jeu de simulation d'une commission locale de l'eau à destination des élèves de collège et de lycée afin de les sensibiliser sur la gouvernance et la gestion de la ressource en eau.

Vers la phase 9 du programme

Au 1^{er} janvier 2025, le PIREN-Seine écrira un nouveau chapitre de son histoire, avec l'entrée dans sa phase 9. Inscrite dans la lignée des phases précédentes, cette dernière cherchera à approfondir et à renforcer l'interdisciplinarité entre les recherches sur l'hydrogéologie, la biologie et la physique du bassin et celles sur les groupes sociaux et leurs pratiques qui influencent et qui sont influencés par ce même bassin.

Le renouvellement thématique de cette phase va permettre d'explorer la vulnérabilité des territoires et des systèmes de gestion de l'eau face à des événements hydroclimatiques extrêmes, d'étudier les flux de matières dans différentes filières du bassin, de voir l'évolution sur le long terme des paysages de ces paysages, d'aborder les enjeux de santé et de biodiversité posés par les contaminants et enfin de se pencher sur les flux de ces polluants et de la matière organique le long du continuum Homme-terre-mer afin de proposer des simulations à partir des scénarios construits dans les autres axes.

Fort de son expérience historique et de sa structure unique basée sur l'échange et la co-construction avec ses partenaires, l'initiative et l'interdisciplinarité des équipes de recherche et la diffusion des connaissances au plus grand nombre, le PIREN-Seine se présente comme un acteur incontournable en faisant face à ces nouveaux défis à relever, à la hauteur des enjeux du XXI^e siècle.



Références



- Anglade J., Billen G., Garnier J., 2018. Contamination des captages d'eau potable d'Auxerre. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2018, 21 p.
- Arrighi A., Barataud F., 2016. Planter des zones tampons sur un territoire ? Construction d'un outil adapté de recueil des perceptions des acteurs sur cette question. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2016, 20 p.
- Barles S., Bonino E., Lee J., Milet H., Thibault J., Poux X., 2017. Prospective urbaine : première étape, la base. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2017, 7 p.
- Beaudoin N., Autret B., Rakotovololona L., Ronceux A., et al., 2017. Quantification et modélisation de la production et des bilans C et N en systèmes de culture biologiques (AB). Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2017, 24 p.
- Beaudoin N., Rakotovololona L., Autret B., Chlébowski F., et al., 2016. Modélisation des bilans eau, carbone et azote en systèmes de culture agriculture biologique et/ou à bas intrants. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2016, 17 p.
- Billen G., Anglade J., Arrighi A., Azougui A., et al., 2015. Quelle agriculture pour demain ? Rapport de synthèse de la phase 6 du PIREN-Seine (2011-2015), volume 1, 2015, 364 p.
- Billen G., Garnier J., Ramarson A., Romero E., et al., 2017. Scénarios prospectifs du système agro-alimentaire du bassin de la Seine à l'horizon 2040. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2017, 17 p.
- Billen G., Ramarson A., Garnier J., Torbey N., Le Noë J., 2016. Modélisation de la cascade de l'azote et de la rétention riparienne par la suite GRAFS-SENEQUE 3.7. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2016, 23 p.
- 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. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2018, 9 p.
- Blanchouin A., Claquin P., Deloffre J., Flipo N., et al., 2017. PHRESQUES : Vers un suivi haute-fréquence homogène et innovant de la qualité de l'eau sur le continuum Seine. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2017, 5 p.
- Carré C., Becu N., De Coninck A., Haghe J.-P., et al., 2015. Changement d'échelle Physique et Sociale. Rapport de synthèse de la phase 6 du PIREN-Seine (2011-2015), volume 6, 2015, 50 p.
- Carré C., Boccarossa A., Dupont N., 2016. La construction commune de connaissances pour la gestion de l'eau et des milieux ? Regards croisés entre opérationnels et chercheurs sur les nitrates et les normes qui leur sont associées. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2016, 14 p.
- Carré C., Bonhomme C., Deroubaix J.-F., Lestel L., et al., 2018. La construction de la connaissance au profit de l'action publique. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2018, 4 p.
- Chlébowski F., Strullu L., Autret B., Rakotovololona L., et al., 2017. Calibration et test de STICS en système de grande culture biologique. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2017, 21 p.
- Dangeard M., Schneider S., Bodet L., Rivière A., et al., 2017. Vers une interpolation hydrogéophysique des propriétés hydrodynamiques de la subsurface : apports du « time-lapse » sismique. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2017, 18 p.
- Dris R., Lahens L., Rocher V., Gasperi J., Tassin B., 2016. Premières investigations sur les microplastiques en Seine. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2016, 24 p.

- Dufour E., 2017. Le métabolisme alimentaire du plateau de Saclay au prisme de la distribution. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2017, 20 p.
- Eschbach D., Lestel L., 2018. Dynamique hydro-morphologique historique de la Seine dans le secteur de la Bassée aval. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2018, 19 p.
- Esculier F., Le Noè J., Barles S., Billen G., et al., 2017. Le système alimentation/excrétion de Paris : oscillations passées, présentes et futures entre linéarité et circularité. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2017, 7 p.
- Flipo N., 2015. Interfaces nappe-rivière. Rapport de synthèse de la phase 6 du PIREN-Seine (2011-2015), volume 2, 2015, 151 p.
- Flipo, N., Lestel, L., Labadie, P., Meybeck, M., Garnier, J. (2020). Trajectories of the Seine River Basin. In: Flipo, N., Labadie, P., Lestel, L. (eds) The Seine River Basin. The Handbook of Environmental Chemistry, vol 90. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/698_2019_43
- Flipo N., Mouchel J.-M., Fisson C., et al., 2018, La qualité de l'eau suite à la crue de juin 2016 dans le bassin de la Seine. Fascicule #17 du PIREN-Seine, éditions ARCEAU-IdF, 72 p.
- Gallois N., Viennot P., 2018. Modélisation de la pollution diffuse d'origine agricole des grands aquifères du bassin Seine-Normandie. Rapport d'étude ARMINES, Centre de Géosciences MINES ParisTech, 2018, 263 p.
- Garnier J., Azougui A., Berthou J., Billen G., et al., 2017. Bilans N, P et C et fuites sous-racinaires des exploitations en grande culture du réseau ABAC (Bassin de la Seine). Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2017, 23 p.
- Gasperi J., Ayrault S., Moreau-Guigon E., 2015. Contamination sur le long terme. Rapport de synthèse de la phase 6 du PIREN-Seine (2011-2015), volume 5, 2015, 160 p.
- Gasperi J., Moreau-Guigon E., Labadie P. et al., 2017. Les micropolluants dans le bassin de la Seine : Alkylphénols, bisphénol A, résidus pharmaceutiques et composés perfluoroalkylés. Fascicule #16 du PIREN-Seine, éditions ARCEAU-IdF, 74 p.
- Geffard A., Talès E., 2015. Écologie et écotoxicologie : Les déterminants de la qualité écologique du milieu aquatique. Rapport de synthèse de la phase 6 du PIREN-Seine (2011-2015), volume 4, 2015, 170 p.
- Gilet L., Gob F., Virmoux C., Touche J., Harrache S., Gautier E., Moès M., 2016. Suivi de l'évolution morphologique et sédimentaire de l'Yonne suite à la première phase du démantèlement du barrage de la Pierre-Glissotte (Massif du Morvan). Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2016, 24 p.
- Gilet L., Gob F., Virmoux C., Touche J., Gautier E., Moès M., 2017. Rétablissement de la continuité écologique de l'Yonne à Château Chinon (Massif du Morvan). Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2017, 20 p.
- Gilet L., Gob F., Virmoux C., Touche J., Gautier E., Moès M., 2018. Évolution morphologique de la retenue du barrage de Pierre Glissotte suite à la seconde phase de l'arasement. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2018, 11 p.
- Groleau A., Varrault G., Garnier J., Laverman A., Flipo N., Mouchel J.-M., 2015. Biogéochimie de l'axe fluvial. Rapport de synthèse de la phase 6 du PIREN-Seine (2011-2015), volume 3, 2015, 189 p.
- Jost A., Wang S., Labarthe B., Flipo N., 2017. Impacts hydrodynamiques des gravières dans la plaine alluviale de la Bassée. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2017, 14 p.
- Labadie P., Simonnet-Laprade C., Maciejewski K., Lachaux V., et al., 2017. Transferts de micropolluants dans les réseaux trophiques lotiques : exemple de l'Orge. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2017, 19 p.
- Labarthe B., Flipo N., 2016. Dynamique des échanges hydriques entre un réseau hydrographique, une plaine alluviale, et leur aquifère régional. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2016, 23 p.

- Le Noë J., Billen G., Garnier J., 2017. Approche biogéochimique pour l'analyse spatiale et temporelle des systèmes de production agricole en France depuis la fin du XIX^e siècle. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2017, 15 p.
- Le Noë J., Billen G., Roux N., Garnier J., Thieu V., Silvestre M., 2018. Les stocks de phosphore dans les sols agricoles : origine et devenir. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2018, 12 p.
- Lebrun J. D., Drouet A., Chaumont C., Uher E., et al., 2016. Écodynamique des contaminants dans les zones tampons humides artificielles (ZHTA) : cas des métaux dans une ZHTA en milieu agricole. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2016, 4 p.
- Lebrun J. D., Rouillac L., El Yagoubi Y., Ayrault S., et al., 2017. Ecodynamique des contaminants dans les zones tampons humides artificielles (ZHTA) en milieu agricole. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2017, 4 p.
- Lestel L., Eschbach D., Steinmann R., Gastaldi N., 2018. ArchiSEINE : une approche géohistorique du bassin de la Seine. Fascicule #18 du PIREN-Seine, éditions ARCEAU-IdF, 64 p.
- Lestel L., Georgescu S., Alexandre P., Davodet J., et al., 2015. Cartographie historique du bassin de la Seine. Rapport de synthèse de la Phase 6 du PIREN-Seine (2011-2015), volume 7, 2015, 29 p.
- Meybeck M., de Marsily G., Fustec E., 1998. La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé. Elsevier, 1998, 752 p.
- Mouchel J.-M., Rocha S., Rivière A., Tallec G., 2016. Caractérisation de la géochimie des interfaces nappe-rivière du bassin des Avenelles. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2016, 27 p.
- Ollier M., Jayet P.-A., 2018. Le système de production agricole à l'épreuve du changement climatique : focus sur la demande d'eau d'irrigation. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2018, 11 p.
- Picourlat F., Jost A., Teillaud S., Passy P., Baratelli F., Flipo N., 2018. Impact des aménagements anthropiques dans la plaine de la Bassée : le cas des gravières. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2018, 10 p.
- Poux X., Lumbroso S., Barles S., Billen G., Garnier J., 2018. Scénarios des systèmes alimentaires du PIREN-Seine : entre scénarios « business as usual » et alternatif. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2018, 7 p.
- Puech T., Gallois N., Schott C., Viennot P., Mignolet C., 2016. Modélisation exploratoire de la pollution des eaux souterraines par deux pesticides : isoproturon et atrazine. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2016, 33 p.
- Rivière A., Flipo N., Ansart P., Baudin A., Marlot L., 2018. Revue des données de température du bassin des Avenelles. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2018, 31 p.
- Steinmann R., Lestel L., Dumont A., 2016. Approche géohistorique de la Seine dans la Bassée durant les deux derniers siècles. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2016, 31 p.
- Tallec 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. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2018, 13 p.
- Tournebize J., Seguin L., Bouarfa S., Chaumont C., et al., 2017. Projet Brie'EAU : des outils de dialogue territorial pour mutualiser les services écosystémiques (qualité de l'eau et biodiversité). Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2017, 20 p.
- Tournebize J., Seguin L., Bouarfa S., Chaumont C., et al., 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. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2018, 11 p.
- Verger Y., Billen G., Garnier J., Esculier F., Barles S., Petit C., Tedesco C., 2016. Visions prospectives de l'agriculture sur le Plateau de Saclay. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2016, 10 p.
- Wang J., Alasonati E., Gélalbert A., Fiscaro P., Benedetti M. F., 2018. Flux de nanoparticules de TiO₂ dans des petits bassins versant. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2018, 11 p.
- Wang J., Alasonati E., Gélalbert A., Sivry Y., Fiscaro P., Benedetti M. F., 2017. Évaluer le devenir des nanoparticules dans les écosystèmes aquatiques. Rapport du PIREN-Seine, Phase VII, 2017, 9 p.

Glossaire



- › **Additif** : substance ajoutée à un produit pour l'améliorer ou lui conférer des propriétés particulières (couleur, conservation, etc.).
- › **Alkylphénols** : famille de composés organiques issus de la carbochimie, obtenus par l'alkylation de phénols, et considérés comme perturbateurs endocriniens.
- › **Anthropoécosystème** : ensemble formé par une communauté d'êtres vivants sur un territoire donné, comprenant l'homme ainsi que ses activités, et de leur interrelation entre eux et avec l'environnement.
- › **Antiépileptiques** : médicaments utilisés dans la prévention ou l'occurrence de l'épilepsie.
- › **Atrazine** : substance active d'un pesticide appartenant à la famille chimique des triazines, qui présente un effet herbicide.
- › **Bactérie dénitrifiante** : bactéries du sol qui transforment l'azote nitrique en azote moléculaire et en ammoniacque. La dénitrification biologique est un processus anaérobie essentiellement assuré par des bactéries.
- › **Bêtabloquants** : médicaments utilisés dans le traitement de certaines maladies du cœur ou de l'hypertension artérielle, qui bloquent l'action des médiateurs sur les récepteurs bêta.
- › **Biogéochimie** : étude du processus cyclique de transfert des éléments chimiques de l'environnement à partir des milieux abiotiques vers les organismes, qui à leur tour retransmettent ses constituants à l'environnement.
- › **Biote** : ensemble des organismes vivants dans un habitat donné.
- › **Bisphénol A** : composé organique de la famille des aromatiques, utilisé principalement dans la fabrication de plastiques et de résines.
- › **Chaînes de modélisation** : ensemble de plusieurs modèles connectés les uns aux autres permettant de simuler un processus naturel en prenant en compte l'interaction de très nombreux paramètres, de l'amont à l'aval et à travers plusieurs compartiments (atmosphère, eaux de surface, sol, nappe, etc.).
- › **Corridors hydroécologiques** : ensemble formé par un corridor fluvial, l'ensemble du territoire et du sous-sol qui lui sont directement associés, ainsi que des organismes qui y vivent.
- › **Cressonnière** : bassin d'eau courante où l'on cultive le cresson de fontaine.
- › **Déclassement (d'une masse d'eau)** : une masse d'eau est dite « déclassée » si un de ses paramètres chimiques dépasse une norme de qualité environnementale (NQE) donnée. Dans le cas de la qualification du bon état écologique d'un cours d'eau, on parle de « déclassement » au sens des critères de la Directive cadre européenne sur l'eau (DCE).
- › **Diuron** : produit phytosanitaire (pesticide) ayant un effet herbicide.
- › **Ecotoxicologie** : étude des polluants toxiques et de leurs effets dans les écosystèmes.
- › **Ecrêtement des crues** : action consistant à abaisser le débit de pointe d'une crue, soit par stockage dans un ouvrage spécifique, soit par extension des zones d'expansion des crues. Un autre moyen est le ralentissement, pour éviter la concomitance avec la pointe d'un affluent par exemple.
- › **Embâcles** : accumulation naturelle de débris apportés par le courant, un glissement de terrain ou un ruissellement.

- › **Équilibre morphodynamique** : équilibre sédimentaire, longitudinal et transversal d'un cours d'eau, atteint par le mouvement naturel du courant, des fonds et des berges.
- › **Etiage** : débit minimal d'un cours d'eau. Il correspond statistiquement à la période de l'année où le niveau d'un cours d'eau atteint son point le plus bas.
- › **Eutrophisation** : ensemble de processus biogéochimiques lié à un enrichissement des eaux en éléments nutritifs. Cet enrichissement se traduit par l'accroissement des biomasses végétales et animales conduisant à l'appauvrissement critique des eaux en oxygène.
- › **Frayères** : zones où se reproduisent les espèces piscicoles, mais également les mollusques et crustacés.
- › **Géomorphologie** : étude scientifique des reliefs et des processus qui les façonnent.
- › **Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)** : famille de molécules constituées d'atomes de carbone et d'hydrogène dont la structure comprend au moins deux cycles aromatiques condensés. Ce sont des constituants naturels du charbon et du pétrole, ou qui proviennent de la combustion incomplète de matières organiques telles que les carburants, le bois, le tabac.
- › **Isoproturon** : herbicide appartenant à la famille des urées substituées. Il est absorbé par les racines et les feuilles et agit comme inhibiteur de la photosynthèse.
- › **Microplastiques** : particule polymère synthétique d'une taille inférieure à 5 mm. Ils peuvent être primaires, c'est-à-dire synthétisés directement sous cette forme, ou secondaires, donc issus de la dégradation de macroplastiques.
- › **Milieu estuarien** : milieu propre à l'estuaire d'un fleuve, qui va du bord de mer au point le plus amont subissant l'impact de la marée. Dans le bassin de la Seine, c'est le barrage de Poses qui marque l'entrée de l'estuaire.
- › **Nitrate** : ion polyatomique de formule chimique NO_3^- — produit naturellement au cours du cycle de l'azote. Une concentration trop importante dans les eaux la rend impropre à la consommation, le seuil de potabilité étant fixé à 50 mg/L.
- › **Norfloxacine** : antibiotique à large spectre, de type quinolone habituellement utilisé pour traiter des infections urinaires, et parfois des infections gastriques.
- › **Ofloxacine** : antibiotique de synthèse appartenant à la famille des fluoroquinolones, souvent utilisée dans les infections urinaires et digestives.
- › **Organochlorés** : composé organique de synthèse, comportant au moins un atome de chlore et utilisé comme solvant, pesticide, insecticide, fongicide ou réfrigérant ou molécules intermédiaires de synthèse en chimie et pharmacie.
- › **Perfluoroalkylés** : molécules aliphatiques (alkyl) dont la totalité (per-) des atomes d'hydrogène a été remplacée par des atomes de fluor (fluoro). Totalement artificielles, ces molécules présentent la particularité de repousser l'eau, les matières grasses et la poussière : elles possèdent en effet une extrémité lipophile (par conséquent hydrophile) et l'autre extrémité hydrophobe (donc lipophile).
- › **Phtalates** : composés chimiques dérivés de l'acide phtalique. Ils sont couramment utilisés comme plastifiants des matières plastiques, notamment du polychlorure de vinyle (PVC). On les retrouve ainsi dans les films plastiques, emballages, revêtements de sol, rideaux de douche, profilés, tuyaux et câbles, matériaux de construction, peintures ou vernis, mais aussi dans certains dispositifs médicaux.
- › **Phytosanitaires** : produit chimique utilisé pour soigner ou prévenir les maladies des organismes végétaux. Par extension, on utilise ce mot pour désigner des produits utilisés pour contrôler des plantes, insectes et champignons. Ces produits font partie, avec les biocides, de la famille des pesticides.
- › **Pollution diffuse** : pollution due à de multiples rejets de polluants dans un temps et un espace relativement étendus, contrairement à la pollution ponctuelle. La pollution des eaux par les nitrates et les pesticides de l'agriculture est un exemple de pollution diffuse : elle se produit sur tout le territoire, d'année en année et affecte grandement la qualité des eaux et les écosystèmes.

- › **Pollution ponctuelle** : pollution identifiée en un point précis, dans un temps et un lieu relativement restreint, contrairement à une pollution diffuse. Un déversement de déchets dans la rivière en sortie d'usine est un exemple de pollution ponctuelle.
- › **Polybromodiphényléthers (PBDE)** : produits chimiques bromés différents, dont certains sont ou ont été utilisés pour ignifuger les matières plastiques et les textiles.
- › **Polychlorobiphényles (PCB)** : polluants organiques persistants c'est-à-dire des substances qui se désagrègent très peu dans l'environnement et s'accumulent dans différents milieux, et en particulier le sol. La production et l'utilisation des PCB sont interdites depuis 1987.
- › **Remobilisation (sédimentaire)** : remise en suspension des sédiments par diverses actions physiques telles que la navigation, et donc des composés potentiellement polluants qu'ils contiennent.
- › **Sulfaméthoxazole** : antibiotique bactériostatique sulfamidé dont l'association avec le triméthoprime est utilisée, sous le nom de co-trimoxazole, dans le traitement de diverses maladies bactériennes.
- › **Tourbière** : zone humide caractérisée par l'accumulation progressive de la tourbe, un sol d'une très forte teneur en matière organique.
- › **Triazines** : groupe d'herbicides (atrazine, simazine et terbuthylazine) très utilisés en grande culture (maïs principalement) et dont la solubilité relativement importante et la dégradation plus lente que celle des autres pesticides.

Acronymes



- › **ANR** : Agence nationale de la recherche
- › **AP** : Alkylphénol
- › **DCE** : Directive-cadre européenne sur l'eau
- › **GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- › **HAP** : Hydrocarbure aromatique polycyclique
- › **IFREMER** : Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
- › **INRAE** : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
- › **LISODE** : Lien social et décision
- › **NQE** : Norme de qualité environnementale
- › **OCAPI** : Optimisation des cycles Carbone, Azote et Phosphore en ville
- › **OMS** : Organisation mondiale de la santé
- › **PBDE** : Polybromodiphényléther
- › **PCB** : Polychlorobiphényle
- › **SAU** : Surface agricole utile
- › **SIAAP** : Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne
- › **SIG** : Système d'information géographique
- › **STEU** : Station d'épuration
- › **UFBSN** : Union des fédérations pour la pêche et la protection du milieu aquatique du bassin Seine-Normandie
- › **ZHTA** : Zone humide tampon artificielle

Pour citer cet ouvrage :

Alexandre Deloménie, François Mercier, et al., 2024. 35 ans d'interdisciplinarité dans le bassin de la Seine. Fascicule #27 du PIREN Seine, ISBN 978-2-490463-27-5, ARCEAU-IdF, 72 p.

Cet ouvrage est édité par la cellule transfert des connaissances du PIREN-Seine, animée par l'association ARCEAU-IdF. Son contenu est issu des recherches menées au sein du programme. Sauf mention contraire, les productions du PIREN-Seine sont régies par licence Creative Commons CC-BY-NC-SA v4.0 ou ultérieure (pas d'utilisation commerciale, partage des conditions initiales à l'identique).



Editeur :

ARCEAU-IdF 2024

Création graphique et impression :

 www.idbleue.com



PEFC/10-31-1510



IMPRIM'VERT®

Crédits photos :

p. 27 : Guelou - p. 33 : Audrey Catteau - p. 40 : franky242/Depositphotos - pp. 50-51 : Alexandre Deloménie - pp. 56, 59 : François Mercier - p. 63 : Mathilde Resch - Autres photos : PIREN-Seine



Le PIREN-Seine est un programme de recherche interdisciplinaire en environnement dont l'objectif est 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. Il est l'un des programmes composant la Zone Atelier Seine du CNRS.

La cellule transfert des connaissances a pour but de valoriser les productions de savoirs scientifiques issues des recherches du PIREN-Seine, et de favoriser la mise à disposition de ces informations à un large public, des professionnels de la gestion de l'eau aux élus en passant par les usagers. Soutenue par l'Agence de l'eau Seine-Normandie et l'EPTB Seine Grands Lacs, et animée depuis octobre 2016 par l'association ARCEAU-IdF, cette cellule répond à une forte volonté de la part des chercheurs de participer au transfert des savoirs scientifiques et techniques vers la société civile. Elle est ainsi chargée de la rédaction et de l'édition de documents thématiques, de la mise en ligne de contenus scientifiques adaptés à la fois aux professionnels et au grand public, et de la mise en place d'ateliers de co-réflexion du programme.

La collection des fascicules du PIREN-Seine analyse différents aspects du fonctionnement du bassin de la Seine, correspondant aux multiples domaines de recherche du programme. Ils s'adressent à tous les publics concernés par l'analyse et la gestion du bassin versant de la Seine et des problématiques environnementales et humaines qui y sont liées. Tous ces fascicules sont disponibles en téléchargement gratuit au format PDF sur le site du programme. Une première série de neuf fascicules a été publiée en 2009. En 2011, six nouveaux titres sont venus enrichir la collection. En 2017, la production des fascicules reprend avec une nouvelle collection, pour permettre aux acteurs du domaine de l'eau et de l'environnement de rester informés des dernières recherches scientifiques menées par le PIREN-Seine.

Pour plus d'informations,
retrouvez-nous sur :
www.piren-seine.fr

ISBN 978-2-490463-27-5



9 782490 463275



Les partenaires opérationnels de la phase 8 du PIREN-Seine



Les partenaires scientifiques de la phase 8 du PIREN-Seine

