

PiREN
Seine



Fascicule #19



30 ans de recherche en environnement sur le bassin de la Seine

30 ans de recherche en environnement sur le bassin de la Seine

Ouvrage rédigé par :
Alexandre Deloménie^[1]

Avec la participation de :

Nicolas Flipo^[2], Jean-Marie Mouchel^[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]

[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

A photograph of a serene forest landscape. A river flows through the center, bordered by dense green foliage and trees. Sunlight filters through the leaves, creating a dappled light effect. In the foreground, there are large, vibrant green plants. Two ducks are visible in the water on the right side.

Sommaire

INTRODUCTION

6

CHAPITRE 1 : Le bassin, ses tissus agricoles et urbains

12

Les flux de nutriments, de la circularité à la linéarité	14
Les pesticides, une pression qui se poursuit	16
Le métabolisme territorial	18

CHAPITRE 2 : Les contaminants du bassin

20

L'histoire sédimentaire de la contamination	22
Les micropolluants, entre héritages et usages actuels	24
Des nouvelles pollutions : les contaminants émergents	26

CHAPITRE 3 : Comprendre le fonctionnement des milieux

28

L'hydrogéologie du bassin : comprendre l'évolution des ressources en eaux	30
La biogéochimie de l'axe fluvial	32
Les zones humides : de l'hydraulique douce pour la gestion de l'eau	34
Les peuplements de poissons	36

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

38

La modification de la géomorphologie	40
La construction de la qualité chimique de l'eau	42
La prospective et les futurs du bassin	44

CONCLUSION

46

Références

48

Glossaire

51

Acronymes

54



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, soit 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 30 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 trois 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, etc. Fort d'une expertise construite sur le long terme et sur la relation de confiance et de co-reflexion 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 aujourd'hui plus de 20 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 : la Zone Atelier Seine du CNRS. Avec le GIP Seine-Aval et l'Observatoire urbain OPUR, les trois programmes forment un ensemble aux compétences et aux territoires d'analyse complémentaires, qui mettent en commun certaines de leurs ressources pour mettre en place 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.

En 2019, le programme achèvera sa 7^e phase pluriannuelle et sa trentième 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. A cette occasion, le programme édite ce fascicule spécial, qui n'a pas la prétention de résumer l'ensemble des recherches, ni même des thématiques traitées au sein du programme, mais d'offrir un panel de l'importance de ses domaines de recherche et témoigner de son interdisciplinarité. 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



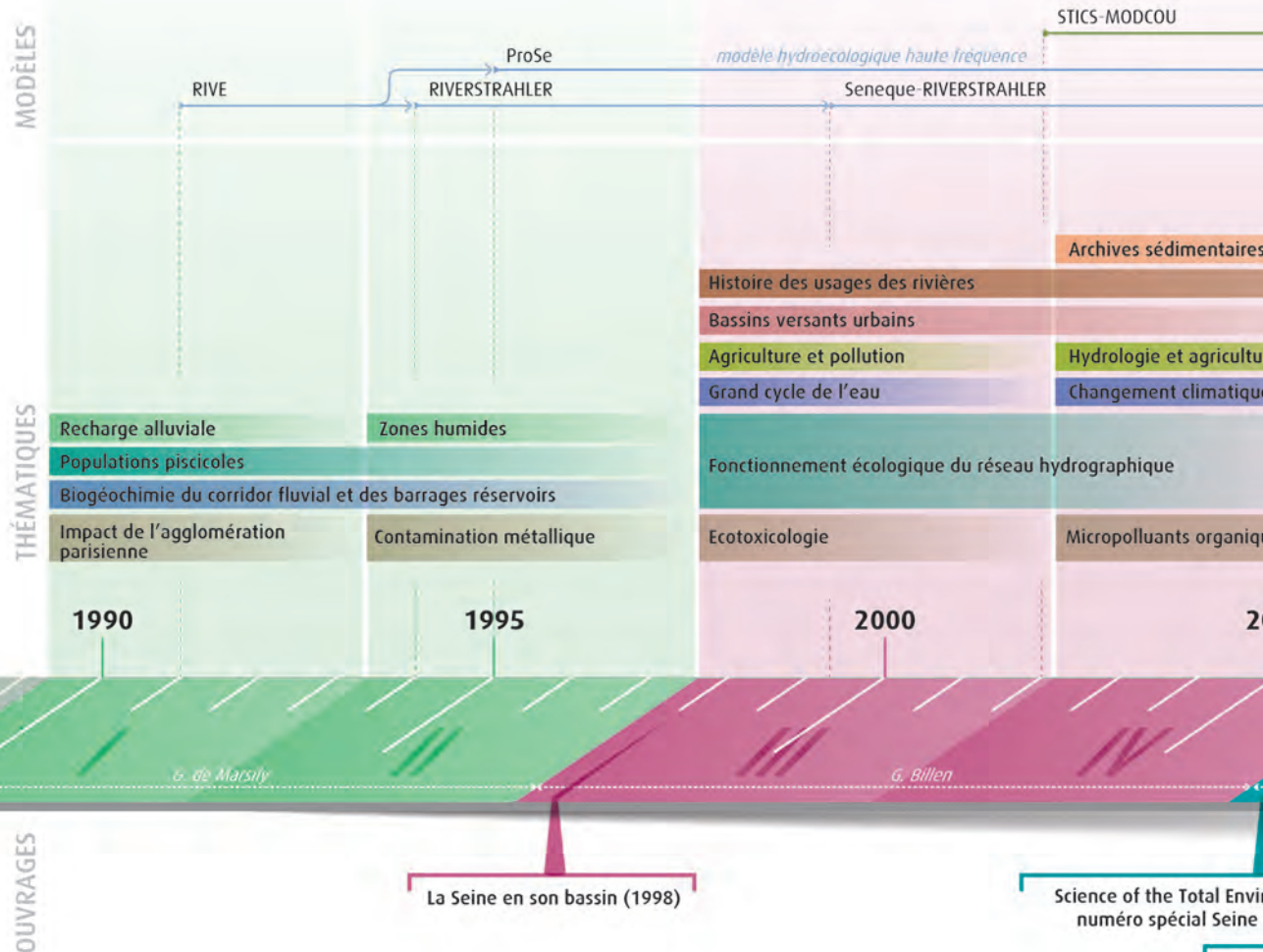
Laboratoire

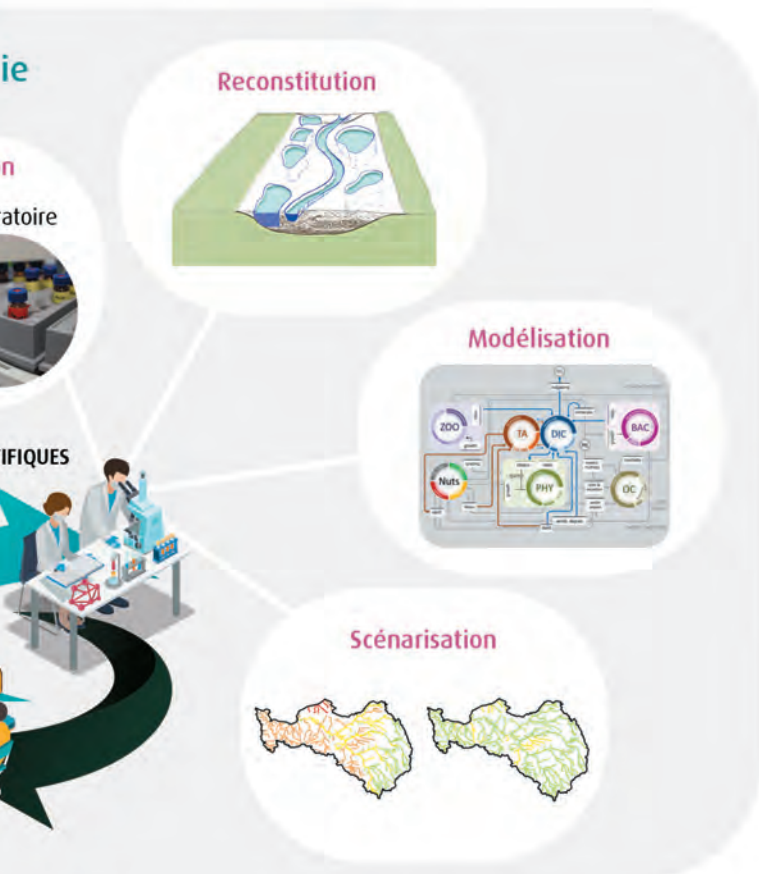


SCIENTIFIQUES

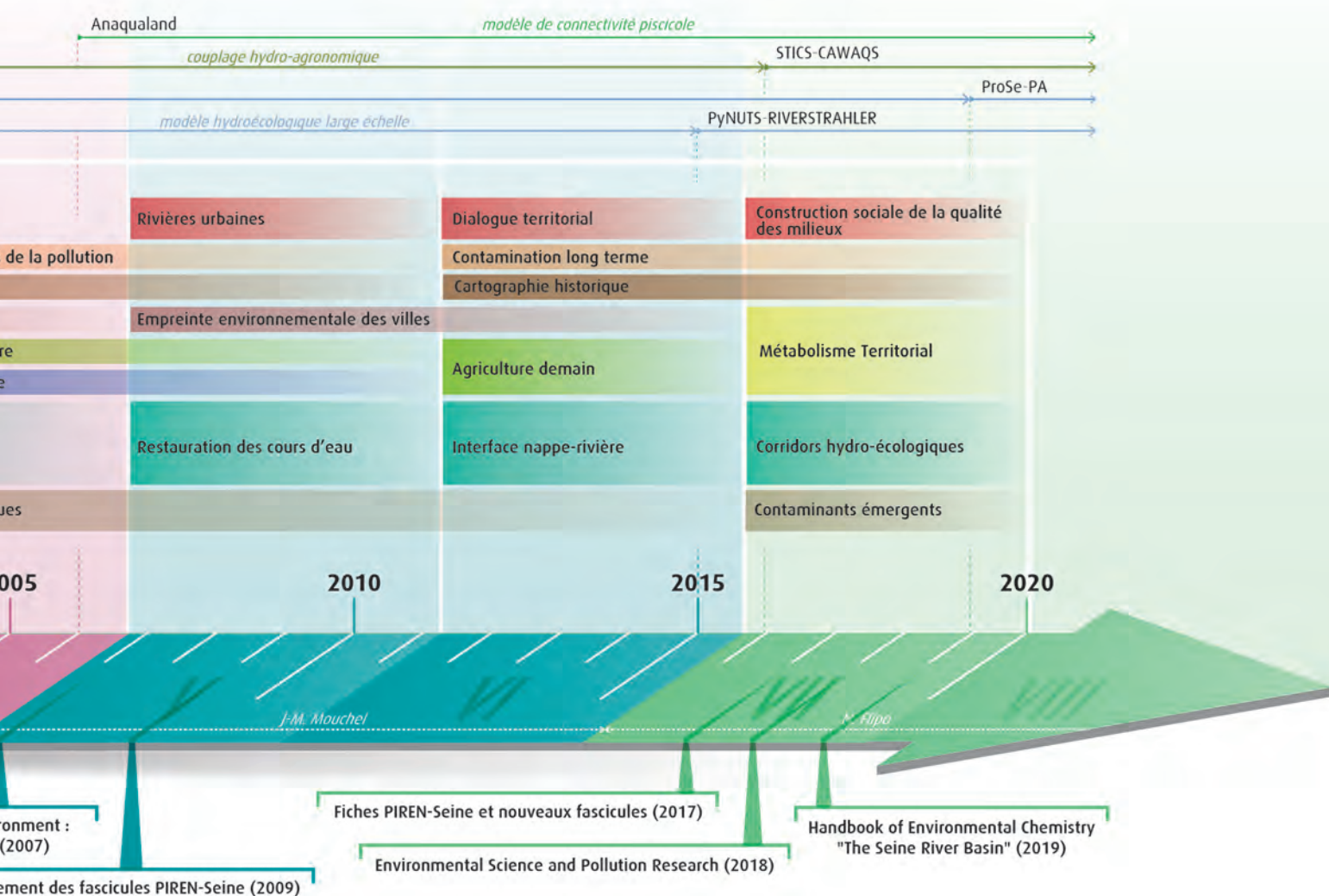


PARTENAIRES





La mise à disposition des résultats



En 2019, le PIREN-Seine, ce sont plus de 100 chercheurs et doctorants :



Avec 20 équipes de recherche :

- **AgroImpact** (Unité de Recherche Agroressources et Impacts environnementaux, UR INRA)
- **AScA** (Applications des Sciences de l'Action)
- **Centre de Géosciences** (UR MINES ParisTech)
- **ECO-PUB** (Économie Publique, UMR 210)
- **EDEN** (Economie et Décision pour l'Environnement, UR INERIS)
- **EPOC** (Environnements et Paléoenvironnement Océaniques, UMR 5805)
- **Géographie-Cités** (UMR 8504)
- **GEOPS** (Géosciences Paris Sud, UMR 8148)
- **GERS-EE** (Géotechnique, environnement, risques naturels et sciences de la terre, laboratoire Eau et Environnement, UR IFSTTAR)
- **HYCAR** (Hydrosystèmes continentaux anthropisés : ressource, risques et restauration, UR IRSTEA)
- **IMPMC** (Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie, UMR 7590)
- **IPGP** (Institut de physique du globe de Paris, UMR 7154)
- **LADYSS** (Laboratoire Dynamiques sociales et recomposition des espaces, UMR 7533)
- **LEESU** (Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains, UMR MA 102)
- **LGP** (Laboratoire de Géographie Physique, Environnements quaternaires et actuels, UMR 8591)
- **LSCE** (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, UMR 8212)
- **METIS** (Milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols, UMR 7619)
- **M2C** (Morphodynamique Continentale et Côtière, UMR 6143)
- **SAD-ASTER** (Science pour l'action et le développement, unité AgroSystèmes TErritoires Ressources, UR INRA)
- **SEBIO** (Stress Environnementaux et BIOSurveillance des milieux aquatiques, UMR-I 02)



Soutenues par **10 universités et écoles d'ingénieurs** :

- Sorbonne Université
- Université de Bordeaux
- Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
- Université Paris Diderot
- Université Paris-Sud
- Université Paris-Est-Créteil-Val-de-Marne
- Université de Reims Champagne-Ardenne
- Université de Rouen Normandie
- MINES ParisTech, PSL Université
- École des Ponts ParisTech

Ainsi que par **6 instituts nationaux** : le CNRS, le CEA, l'INRA, l'IRSTEA, l'INERIS et l'IFSTTAR.

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

- La cellule « **Données** », animée par la FIRE
- 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.

ZA Zones
Ateliers
LTSE FRANCE SEINE





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 30 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 agro-alimentaire 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 50mg/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

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.

Enfin, le PIREN-Seine s'est investi dans le couplage de modèles préexistant pour créer des chaînes de modélisation de plus en plus abouties. Ainsi, le couplage du modèle STICS de l'INRA et du modèle MODCOU, aujourd'hui CaWaQS développé par MINES ParisTech, 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 de l'INRA, une base de données décrivant l'évolution des systèmes agricoles dominants sur les 50 dernières années, à l'échelle du bassin hydrographique Seine-Normandie.

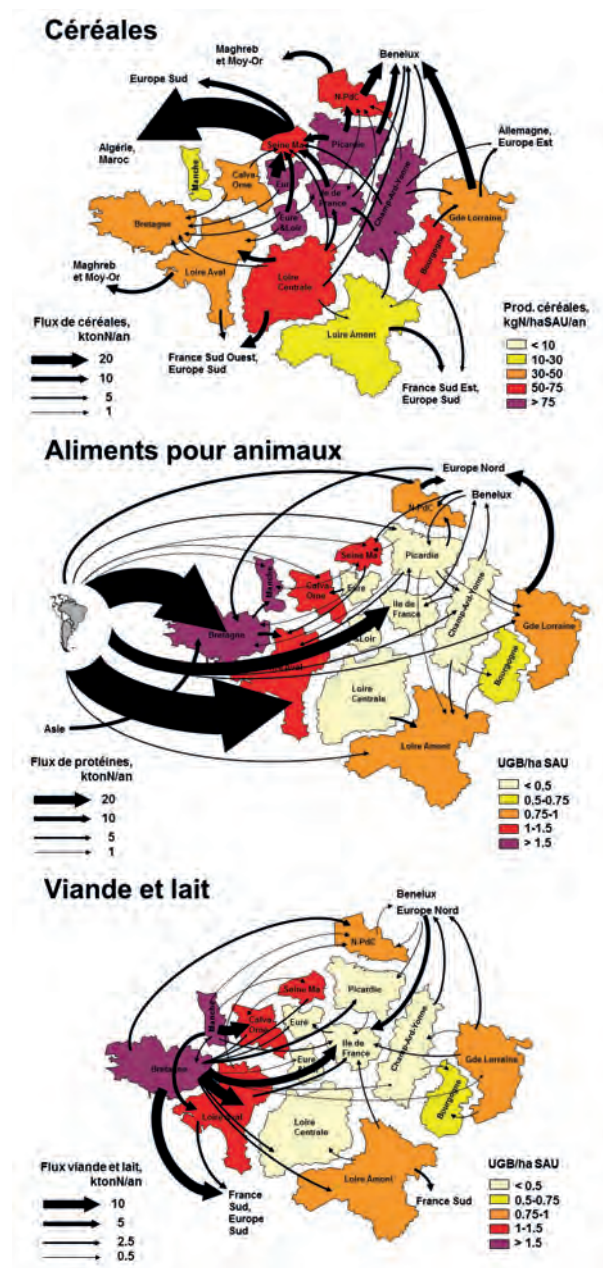


Figure 1 : Flux d'échanges commerciaux (exprimés par leur contenu en azote) de céréales, d'aliments pour animaux (soja et tourteaux) et de produits animaux (viande, œufs et lait), entre les régions agricoles du nord de la France et avec l'étranger en 2006. Données Sitram (d'après Le Noë et al., 2016). 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).

atmosphérique est un processus couteux en énergie, fortement dépendant des hydrocarbures fossiles, qui 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, 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 l'Irstea, 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 2018 une fiche 4 pages, intitulée « La séparation à la source de l'urine », 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/la_separation_a_la_source_de_lurine

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, sur l'environnement et sur 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 30 ans, ce sont ainsi une centaine de molécules qui ont été documentées, 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, en lien avec les usages et l'hydrologie. 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 de l'INRA 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.

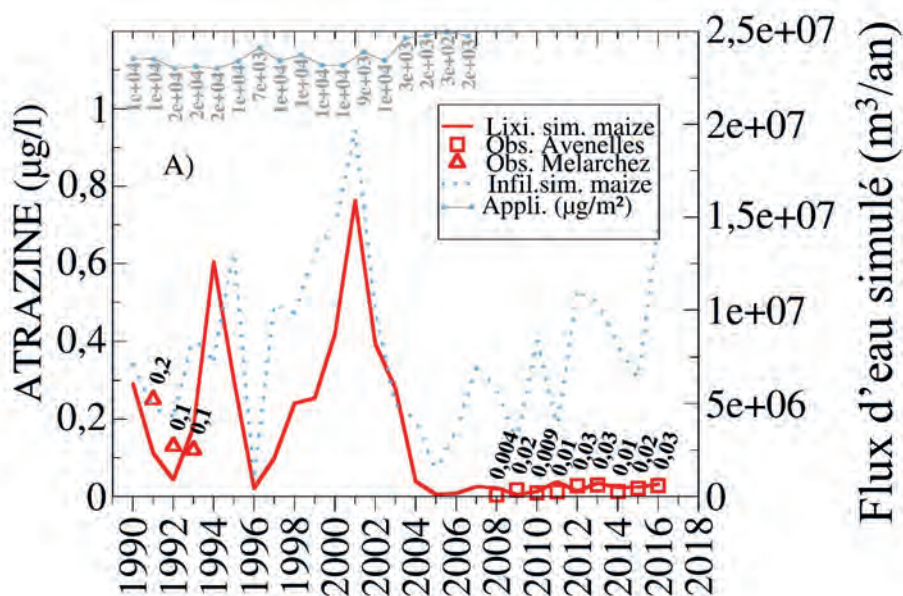


Figure 2 : Concentrations en atrazine observées (carrés et triangles rouges) et simulées (trait rouge) dans l'Orgeval et les volumes d'eau écoulés (trait pointillé bleu ; échelle de droite). L'atrazine a été interdite en 2004 dans l'Union européenne.



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.

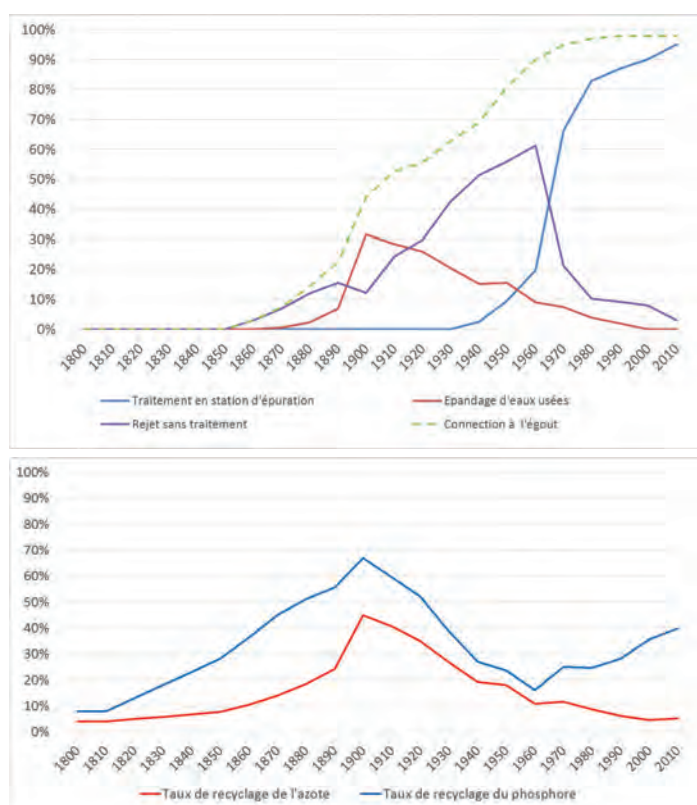


Figure 3a et 3b : Evolution des techniques de traitement des excréta de l'agglomération parisienne (1), et taux de recyclage de l'azote et du phosphore (2) de 1800 à 2010.

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 à paraître

Les études les plus récentes dans le domaine ont permis notamment 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 excréta 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, à paraître.



CHAPITRE 2



Les contaminants du bassin

Fort d'une population atteignant en 2019 près 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, ce domaine de recherche historique du 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.

L'étude des carottes sédimentaires répond à plusieurs objectifs scientifiques et environnementaux. Elle permet tout d'abord d'identifier le bruit de fond géochimique d'un territoire. Le bassin de la Seine possède en effet des spécificités, du fait de son caractère sédimentaire calcaire et du climat tempéré et océanique auquel il est soumis. Dès lors, certains éléments comme les métaux peuvent y être présents à l'état naturel, et composer le bruit de fond du bassin, alors qu'ils seront considérés comme des contaminants dans un autre bassin présentant des caractéristiques différentes. Pour identifier une pollution, il faut pouvoir définir l'état antérieur à cette pollution. C'est, entre autres, à cette question que répond l'analyse des carottes sédimentaires : quelle est la place de cet élément dans un environnement à l'état naturel ?

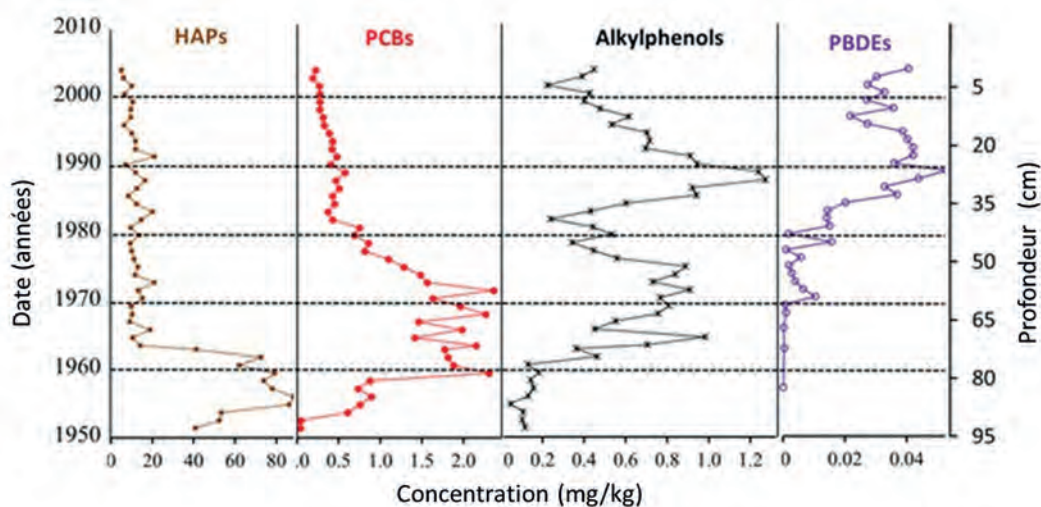


Figure 4 : Concentration en HAP, en PCB, en Alkylphénol et en PBDE des archives sédimentaires en Seine.

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 terrain, et d'établir des liens entre l'introduction de nouveaux produits et de nouveaux usages dans la société humaine et la pollution de l'environnement. C'est notamment grâce à ces études que les pics de pollution ont pu être identifiés, comme celui des HAP dans les années 1950-1960, ou des métaux et les 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, 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.



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. Ces polluants organiques qui peuvent soit être produits avec un objectif industriel, soit résulter d'une combustion produisant les HAP. 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 contaminants que sont les métaux, les HAP, 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 demeure prioritaire compte tenu du caractère remobilisable de ces molécules, l'agglomération parisienne représentant un stock important de ces composés (toitures, stockage domestique, etc.). Les HAP 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.

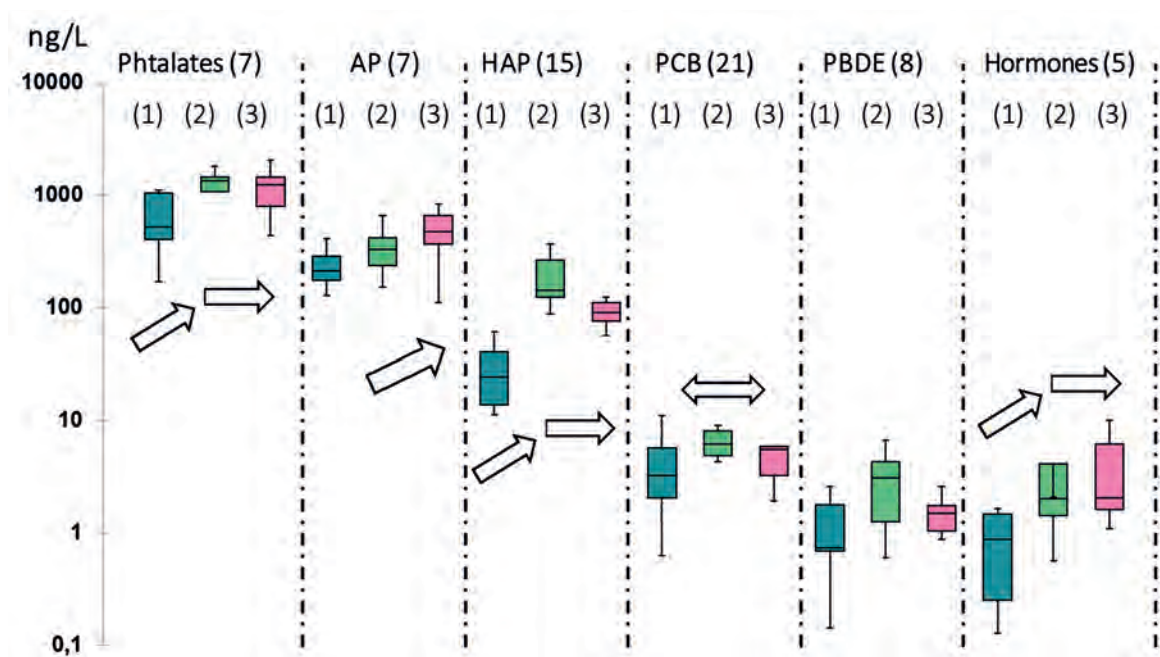


Figure 5 : Suivi de plusieurs contaminants sur l'axe Seine entre Marnay-sur-Seine (bleu), Bougival (vert) et Triel-sur-Seine (rose).

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.

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 les travaux les plus récents du programme dans ce domaine :



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.

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 présentent dans l'air se déposent à un rythme allant de 50 à 300 fibres/m²/jour dans l'agglomération parisienne.

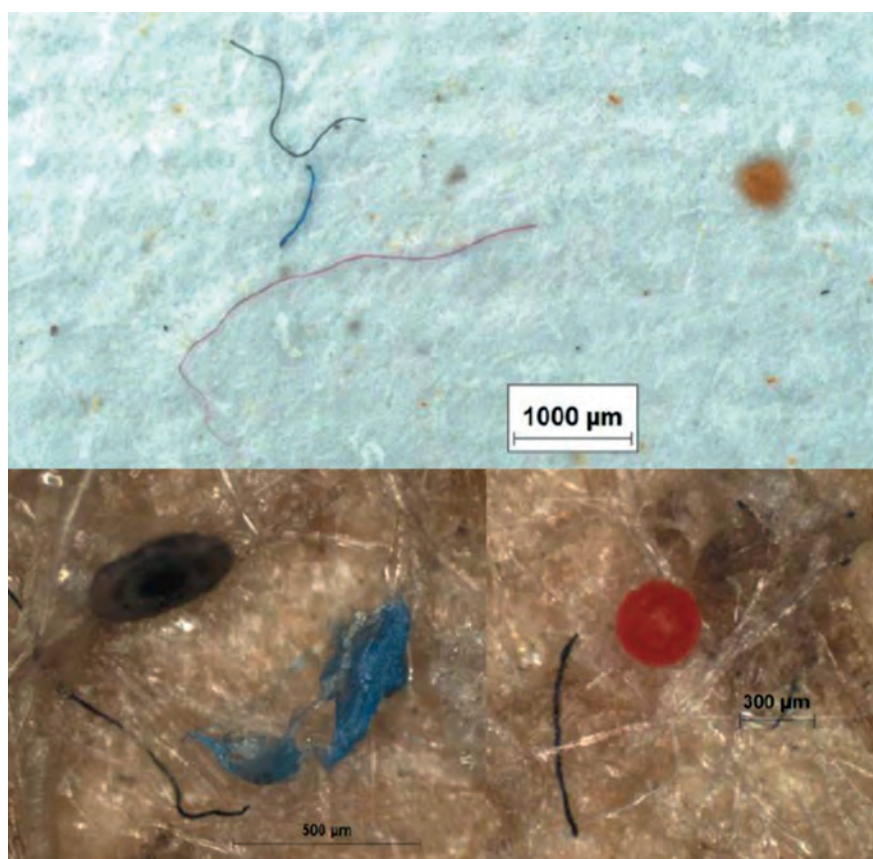


Figure 6 : Fragments de microplastiques retrouvés dans des échantillons d'eau de la Seine.

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 50µm 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.

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 TiO₂, 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



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 en passant par le suivi des populations piscicoles 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 10m³ 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 de l'évolution 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 les compétences de plusieurs équipes en hydrologie, hydrogéologie, en biogéochimie et géophysique. A titre

On modélise !

Le PIREN-Seine s'est investi dans le couplage de modèles préexistant pour créer des chaînes de modélisation de plus en plus abouties comme le couplage STICS-MODCOU (cf. page 12) qui permet de simuler le transfert des nitrates des parcelles agricoles aux aquifères du bassin de la Seine. Plus récemment, une plate-forme de modélisation a vu le jour au sein du PIREN-Seine, avec pour ambition de simuler la qualité de l'eau de l'ensemble des différents compartiments du bassin versant, sols, aquifères, cours d'eau : CaWaQS (Catchment Water Quality Simulator). Ces outils permettent également d'étudier les effets du changement climatique sur la ressource en eau du bassin de la Seine.

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.

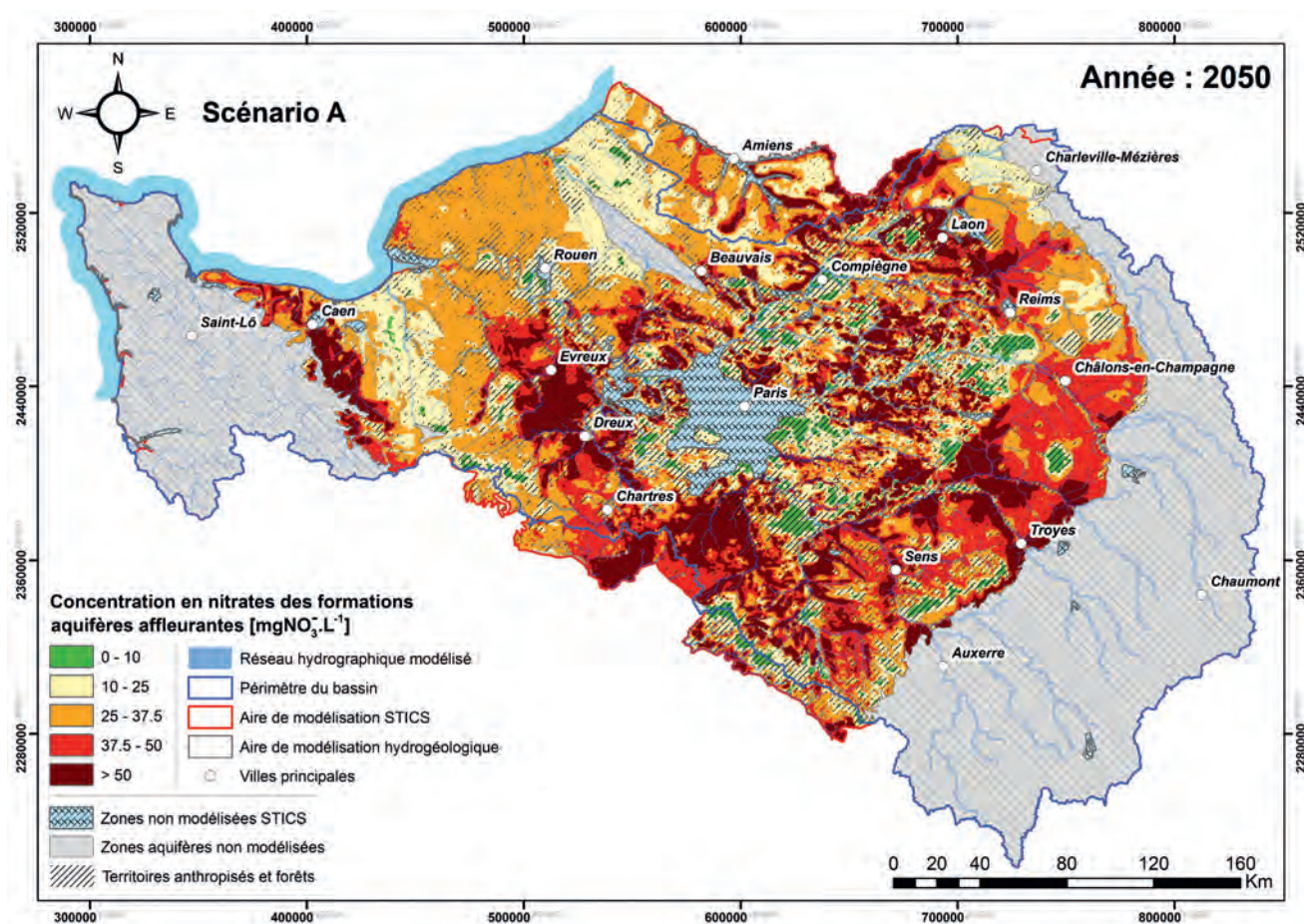


Figure 7 : Modélisation de la concentration en nitrate des formations aquifères dans le bassin de la Seine. Le seuil de 50mg/L de nitrate (rouge foncé) est le seuil de potabilité de l'eau.

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, 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 d'épuration (STEP) 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 30 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 2016. La centralisation, l'analyse et l'interprétation des données ont ainsi permis de faire un état des conséquences de cet événement exceptionnel, qui avait eu lieu en juin, 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, dont les données sont en cours d'analyse.

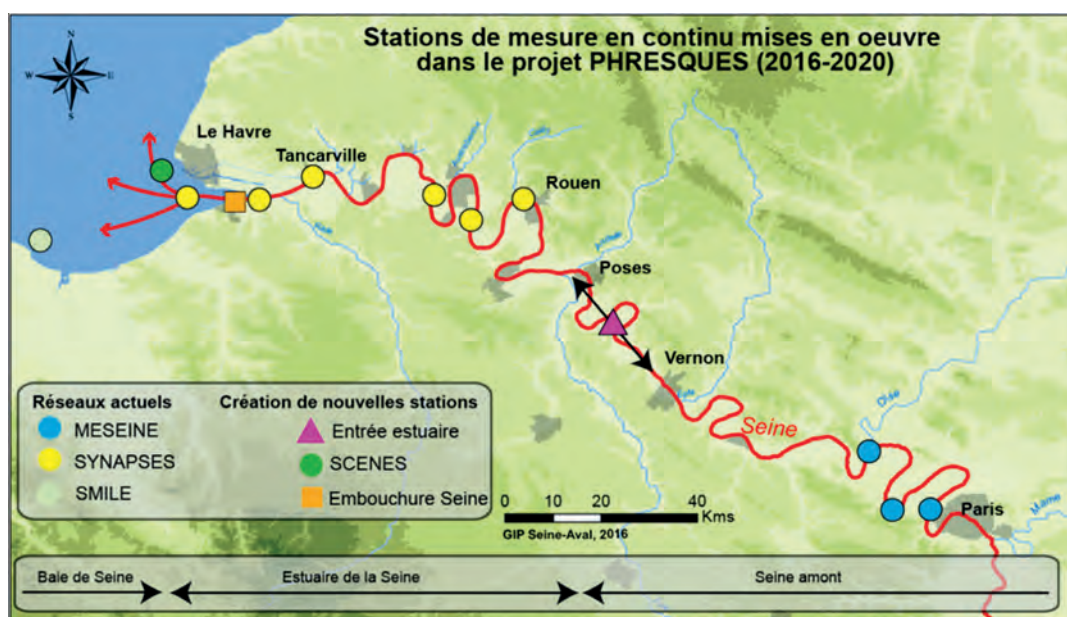


Figure 8 : Les stations de mesure en continu du projet PHRESQUES.

Source : GIP Seine-aval

On modélise !

Le logiciel ProSe, développé à partir du modèle RIVE par MINES ParisTech, 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 afin de concevoir les 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. La mise en place d'un dispositif de suivi en continu de la qualité de l'eau cohérent à l'échelle du continuum Seine, fait actuellement l'objet d'un travail conjoint avec le GIP Seine-aval, groupement de recherche

qui assure le suivi du milieu estuarien de la Seine. Baptisé PHRESQUES (Projet d'Harmonisation et de RENforcement du Suivi haute-fréquence de la Qualité de l'Eau de la vallée de Seine), ce projet permettra à terme d'avoir un suivi haute fréquence allant de la confluence Marne jusqu'à la Manche.

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 : 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.

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 sont des enjeux majeurs 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 un élément central de ce système 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/éducation 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 l'INRA, l'Irstea et LISODE tels que *Mété'eau*, *Co-click'eau* et *Rés'eaulution* 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 a abouti à la construction en 2010 d'une zone tampon humide artificielle en sortie de drainage d'un versant de 355ha 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).

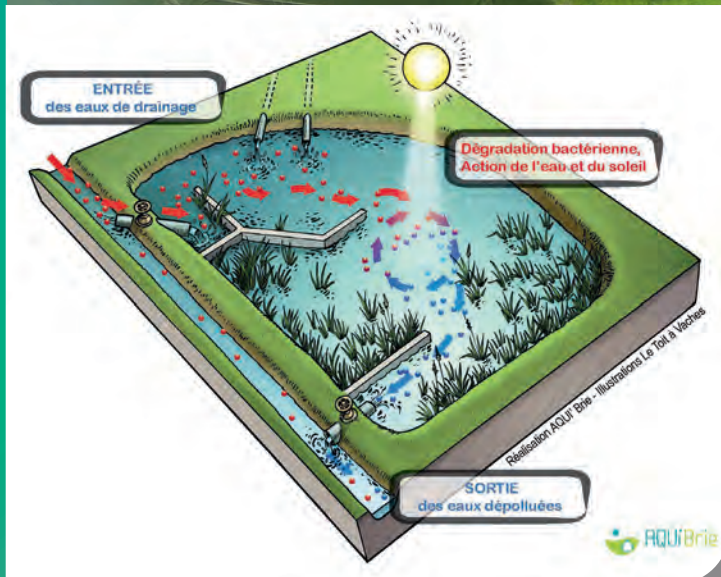


Photo et schéma de la ZHTA de Rampillon (Seine-et-Marne)

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

Après une concertation avec les agriculteurs, la ZHTA possède une surface de 5600m² et un volume de 2500m³, soit un ratio surface ZHTA sur surface drainée de 7m³ par hectare drainé. Les coûts de l'étude, maîtrise d'œuvre et de la construction s'élèvent 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 Pendimethalin à 0% pour 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.

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, mesure 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'aloise, 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 est actuellement expérimentée 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. En cours de développement méthodologique, il semblerait que cette technique soit un outil efficace et fonctionnel pour le suivi de la richesse spécifique d'un bassin versant. A terme, ces recherches permettront ainsi de mieux caractériser les peuplements de poissons sur l'ensemble des cours d'eau du bassin de la Seine.



On modélise !

Anaqualand 2.0 est un logiciel de modélisation de la connectivité dans les cours d'eau développé par l'Irstea 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 à l'aval du Grand Morin et est en cours de couplage sur l'axe Seine.



On synthétise



Le PIREN-Seine a édité en 2017 une fiche 4 pages, intitulée « Recherches sur le peuplement de poissons 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_le_peuplement_de_poissons_du_bassin_de_la_seine



CHAPITRE 4



Les usages de l'eau, des trajectoires passées, 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.

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 symbolique 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).

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

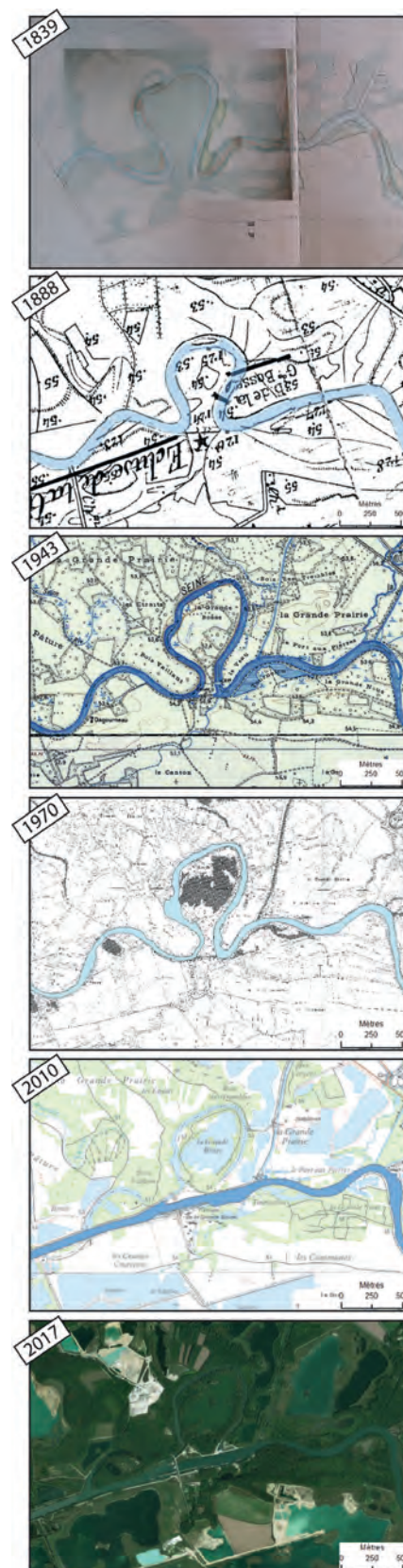


Figure 9 : Cartes anciennes dans le secteur de la Grande Bosse entre 1839 et 2010. Photo aérienne du même secteur en 2017.

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

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, est ainsi suivi depuis 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. 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 :



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.

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

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 technique et légal 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.

Etudiée 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

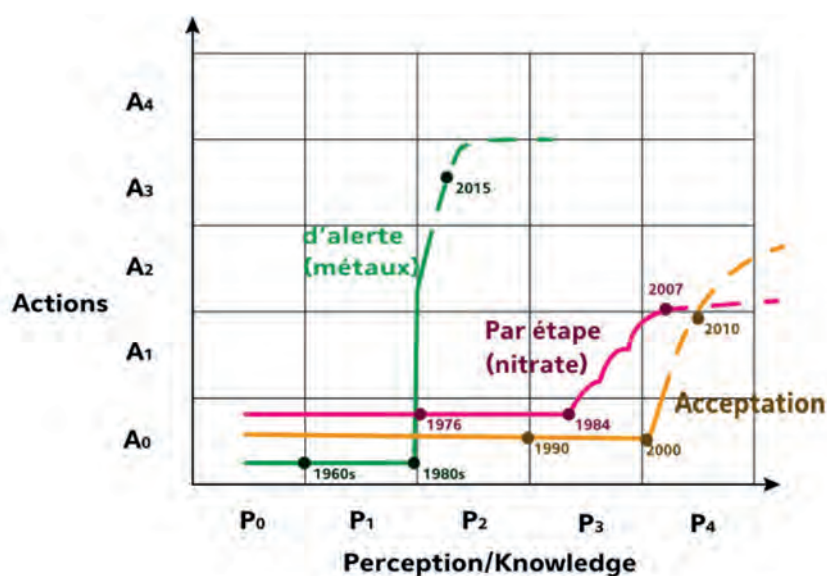


Figure 10 : Trajectoires de la société face à un problème de l'environnement. Perceptions/actions. Principales trajectoires sociales perception-action. A0 à A4 : formes d'action, P0 à P4 perception et connaissance des problèmes.



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 de 2024 qui se dérouleront à Paris, peuvent agir comme un levier important sur la prise de décision par les pouvoirs publics, concernant les niveaux de bactéries indicatrices fécales ou la navigation. La qualité de l'eau doit ainsi être étudiée au regard des usages de celle-ci.



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 dans le futur, 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).

Mais au-delà des pressions qu'exercera le changement climatique sur nos usages futurs de l'eau d'ici à la fin du siècle, de nombreuses évolutions de la société peuvent, à moyen terme, avoir des conséquences très lourdes sur la ressource. Du mode d'organisation de notre système agro-alimentaire à la production de produits polluants domestiques et industriels, et 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 et dont les conséquences à long terme sont encore mal connues. Les équipes du programme ont ainsi construit de nombreux scénarios, basés sur les modèles hydroécologiques et agronomiques, et dont l'exploration permet de croiser des visions diverses des futurs possibles du bassin de la Seine à des horizons de moyen ou de long terme (2050-2100).

Ainsi, les équipes scientifiques spécialisées dans divers domaines, ont co-construit, avec les partenaires du programme divers scénarios, certains sur les impacts du système agricole, sur les eaux souterraines, d'autres sur les eaux de surface, d'autres encore sur l'occupation et l'utilisation urbaine ou rurale des sols, ou sur les dynamiques de transferts de nutriments dans le bassin. Toutes ces équipes ont également construit un scénario de poursuite du système actuel, qui montre des conséquences préoccupantes à l'horizon 2050 : les masses d'eau souterraines verront leur contamination en nitrate augmenter, les débits devraient baisser en période d'étiage, la qualité des eaux de surface se détériorera vraisemblablement en aval des métropoles du fait d'une plus faible capacité de dilution, la déconnexion physique et sociale entre zone urbaine et zone rurale s'intensifiera, et le transport des matières, y compris des nutriments, augmentera tant en volume qu'en distance.

Mais les équipes de recherche proposent également plusieurs scénarios d'amélioration de la qualité de l'eau et d'une gestion durable. Le passage en agriculture biologique d'au moins 30% de la SAU (surface agricole utile), dans les aires protégées et les parcs naturels régionaux par exemple pourrait ainsi contribuer à faire baisser la contamination nitrique et en pesticides des nappes. L'adoption d'un régime demitarien, qui divise par deux l'ingestion de protéines d'origine animale, permettrait de réduire notre pression sur la ressource, tout en reconnectant les cultures végétales et l'élevage. La consommation prioritaire de denrées locales et de saison permettrait 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.

Si aujourd'hui les scénarios proposent des chemins divers qui peuvent encore parfois manquer de réalisme, 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. Les contaminants issus de l'industrie et des usages domestiques seront ainsi introduits à ces nouveaux scénarios qui seront en outre confrontés les uns aux autres pour faire émerger des visions claires et cohérentes des futurs possibles, prenant en compte les aspects agricoles, urbains, industriels, sociaux et politiques. Loin de constituer des scénarios prescriptifs, il s'agit d'apporter un éclairage aux débats sur l'avenir du territoire et une aide précieuse pour les décideurs politiques en charge de la gestion de l'eau et des milieux aquatiques, afin de garantir la préservation et la durabilité de nos ressources.

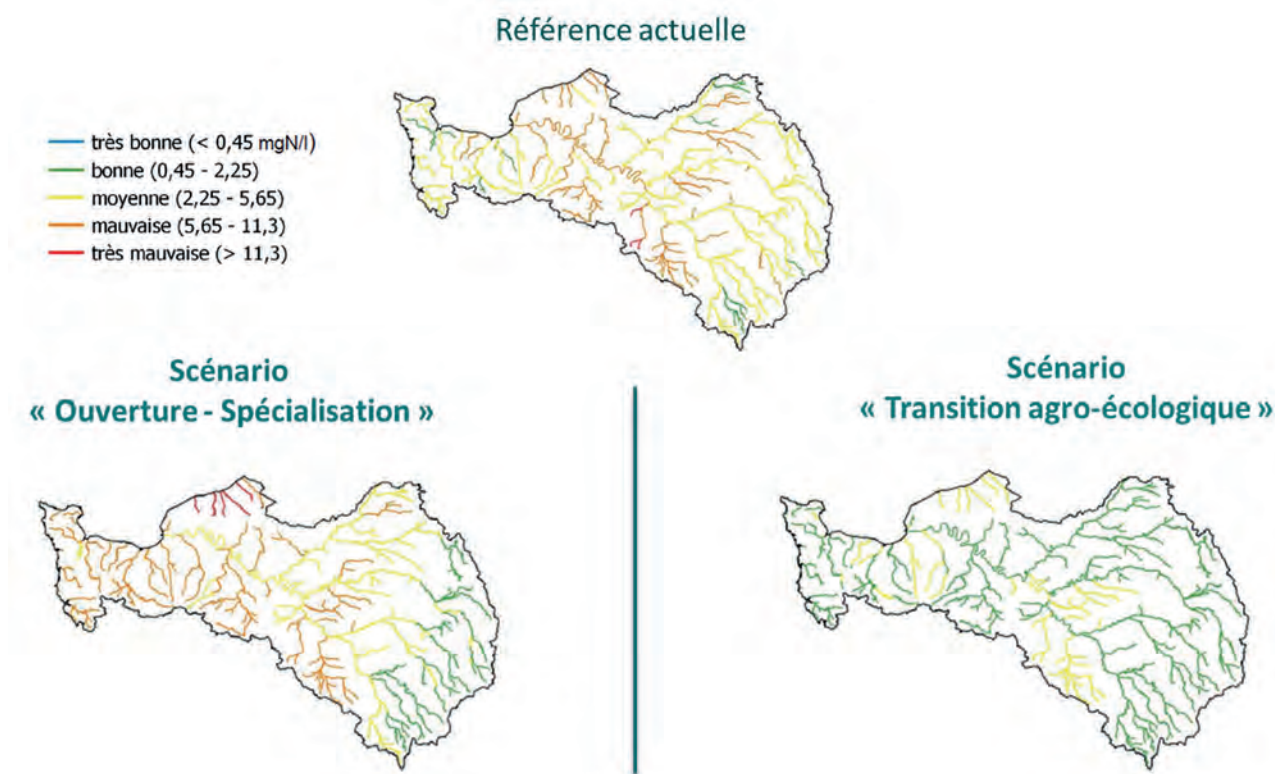
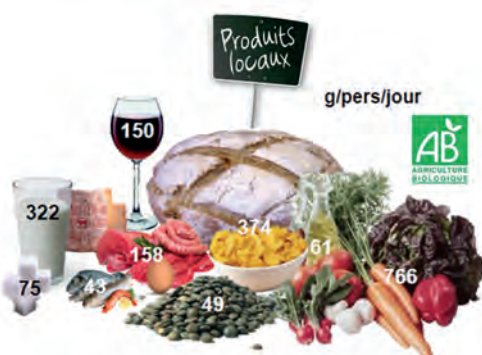


Figure 11 : Scénarios à 2050 de la concentration en nitrate dans les eaux de surface sur le bassin Seine-Normandie. Le scénario « Ouverture – Spécialisation » prévoit un prolongement des réglementations et méthodes de production agricole actuelles, avec une amélioration des technologies de traitement de l'eau. Le scénario « Transition agro-écologique » prévoit une reconnexion agriculture-élevage, un passage en biologique d'une partie de la surface agricole, et l'adoption d'un régime demitarien par la population du bassin.

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.



Conclusion

Le PIREN-Seine fête en 2019 ses trente 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. De nombreuses autres actions sont menées sur les contaminants, la matière organique, l'interaction nappe-rivière, la gouvernance de l'eau, l'écotoxicologie, l'hydrogéologie ou la restauration écologique, dont l'énumération à elle seule pourrait remplir un nouveau chapitre de ce 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-reflexion

Si les partenaires du PIREN-Seine participent chaque année au comité de coordination afin de discuter les actions de recherche dans le cadre du programme pluriannuel des actions de recherche, ils sont également impliqués dans la recherche elle-même à travers les ateliers de co-reflexion. 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 rapports annuels et de synthèse

Fidèle à sa démarche de diffusion libre des connaissances scientifiques, les équipes de recherche publient chaque année un rapport d'activité détaillé, qui compile leurs travaux et leurs résultats. Entre 2015 et 2018, ce sont entre 30 et 40 rapports de recherche par an qui ont été édités et mis en ligne sur le site du PIREN-Seine, en téléchargement libre et gratuit. En 2019, ce sont 8 volumes de synthèse qui sont publiés, retraçant l'ensemble des travaux menés lors de la phase VII. 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.

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 *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.

Enfin, 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 Optimisation des cycles Carbone, Azote et Phosphore en ville (OCAPI). Adressés aux associations locales, au personnel enseignant 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.

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.

Aller plus loin sur le web

Depuis plusieurs années, le PIREN-Seine s'est donné pour ambition d'accroître sa présence en ligne. La création d'un nouveau site (www.piren-seine.fr), la valorisation des documents produits, l'entretien d'une bibliographie scientifique riche et le relai des informations et actualités médiatiques en lien avec le programme y constituent les principaux contenus. Véritable plateforme de 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. Mais d'autres outils y font progressivement leur entrée. Une médiathèque du programme a ainsi vu le jour en 2017, afin de compiler les photos et vidéos du programme (<https://media.piren-seine.fr/>) et une version en anglais du site a été lancée en 2018, avec du contenu adapté en conséquence pour toucher un public international. La présence du PIREN-Seine sur le web vise enfin à s'étendre à partir de 2020, avec une approche thématique plus facile d'utilisation, une interaction facilitée avec les organismes partenaires scientifiques via la ZA-Seine, et une mise à disposition progressive des données du programme par une interface dédiée.

A partir du 1^{er} janvier 2020, le PIREN-Seine écrira un nouveau chapitre de son histoire, avec l'entrée dans sa phase VIII. L'arrivée de nouveaux partenaires et la refonte des axes de recherche d'enjeux majeurs de la gestion de l'eau à moyen et à long terme marqueront cette étape majeure. Le fonctionnement du bassin de la Seine soumis à des extrêmes hydroclimatiques sous l'action du changement climatique, l'attention portée à la métropole parisienne à l'horizon des Jeux olympiques de 2024 et au-delà, la poursuite des analyses des trajectoires des tissus agricoles et urbains du bassin, l'intégration des contaminants dans le métabolisme territorial, et la question fondamentale de la construction de la qualité de l'eau conciliant risque et biodiversité constituent autant de nouveaux terrains de travail expérimental, de modélisation et de production de connaissances scientifiques pour le programme. Fort de son expérience historique et de sa structure unique basée sur l'échange avec ses partenaires, l'initiative et l'interdisciplinarité des équipes de recherche et la diffusion des connaissances au plus grand nombre, le PIREN-Seine entre ainsi dans sa 4^e décennie d'existence 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 Noë 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., 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., Vermoux C., Touche J., Harrache S., Gautier E., Moës 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., Vermoux C., Touche J., Gautier E., Moës 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., Vermoux C., Touche J., Gautier E., Moës 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., Gélabert 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., Gélabert 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.
- **Norfloxacin** : antibiotique à large spectre, de type quinolone habituellement utilisé pour traiter des infections urinaires, et parfois des infections gastriques.
- **Ofloxacin** : 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 triméthoprim 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 terbutylazine) 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
- **INRA** : Institut national de la recherche agronomique
- **IRSTEA** : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
- **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
- **STEP** : 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 :

A. Deloménie, et al., 2019. 30 ans de recherche en environnement sur le bassin de la Seine. Fascicule #19 du PIREN Seine, ISBN 978-2-490463-09-1, ARCEAU-IdF, 56 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 2019

Création graphique et impression :

 id bleue (Sablé-72) - www.idbleue.com

Crédits photos :

Photo Marnay-sur-Seine p.23 : Guelou - Photo Poissons p.34 : franky242/Depositphotos - 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 978-2-490463-09-1



Les partenaires de la phase 7 du PIREN-Seine

