

## Introduction générale

### Le programme PIREN-Seine, phase 6, 2011-2015

*Le programme PIREN-Seine a été créé en 1989, à l'initiative conjointe de gestionnaires et de chercheurs du bassin de la Seine, il s'est intégré au Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement qui avait été lancé dans les années 80 par le CNRS et le ministère de l'environnement. D'autres programmes consacrés aux grands fleuves français (Rhône, Garonne, Plaine d'Alsace) contribuaient également au PIREN. Ces programmes ont largement mobilisé la communauté scientifique dans la durée puisque la plupart des dynamiques lancées il y a trente ans sont toujours actives. Le réseau des Zones Ateliers regroupe aujourd'hui ces programmes consacrés aux grands fleuves, il a permis le développement d'autres programmes liés aux fleuves et leurs bassins versants (Loire, Moselle) et a également intégré dès sa création des programmes de structure différente et focalisés sur d'autres enjeux (agro-écologie, histoire et fonctionnement des paysages...). Tous ces programmes partagent la volonté d'étudier sur le long terme les interactions entre la société et la nature. Depuis 2015, le périmètre de la Zone Atelier Seine, initialement identifié au programme PIREN-Seine a été élargi au programme scientifique du GIP Seine-Aval, qui se consacre principalement à l'estuaire de la Seine et à sa zone côtière, et au programme OPUR qui se consacre aux pollutions au sein de la zone métropolitaine parisienne.*

*Depuis sa création le programme PIREN-Seine travaille en étroite interaction avec les gestionnaires du bassin de la Seine. Cette interaction se traduit dans la construction des programmes pluri-annuels qui ont structuré les activités du programme, et par un soutien financier important et pérenne sans lequel le programme ne pourrait pas se développer dans la durée. C'est la durée qui permet le développement d'observatoires, de bases de données et de modèles qui recouvrent l'ensemble du bassin de la Seine, et c'est sur ces bases que le programme peut continuer à développer ses activités avec ses partenaires.*

*Pour sa 6<sup>ème</sup> phase (2011-2015), le programme PIREN-Seine a été soutenu par*

- l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN),*
- le Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP),*
- la Direction Interdépartementale et Régionale de l'Environnement et de l'Energie d'Ile-de-France (DRIEE),*
- le Syndicat des Eaux d'Ile de France (SEDIF),*
- l'Institution Interdépartementale des Barrages-Réservoirs du Bassin de la Seine (IIBRBS),*
- Eau de Paris,*
- la Lyonnaise des Eaux,*
- le Syndicat de l'Orge,*
- la région Ile de France via le soutien de plusieurs doctorants,*
- et le CNRS via l'Institut Ecologie et Environnement (INEE) qui organise aussi l'évaluation scientifique du programme dans le cadre fourni par les zones ateliers.*

*Les chercheurs et enseignants-chercheurs de plus de vingt unités des recherche contribuent aux travaux du programme, ils viennent de nombreuses universités, dont l'UPMC qui se charge de la gestion budgétaire du programme, d'instituts de recherche, dont le CNRS, l'INRA et IRSTEA, de grandes écoles. Plus de trente thèses de doctorat menées dans le cadre du programme ont été soutenues au cours de la période 2011-2015.*

*Pour sa 6<sup>ème</sup> phase, le programme PIREN-Seine a structuré ses travaux autour de 5 axes de recherche principaux. Ces axes de recherche ont été dessinés pour répondre à des questionnements de nos partenaires tout en poursuivant la démarche scientifique de long terme engagée par le programme.*

*Résumons par les objectifs-clés suivants les principales attentes pour chacun des 5 axes :*

- proposer pour le bassin de la Seine des scénarios pour l'agriculture qui soient compatibles avec les exigences de qualité de l'eau ;*
- identifier le rôle des zones humides, en passant d'études localisées à une vision fonctionnelle*

*d'ensemble à l'échelle du bassin de la Seine, y compris pour la zone humide emblématique qu'est la Bassée ;*

- *affiner notre compréhension de la qualité de l'eau dans les axes fluviaux, dans le contexte d'une amélioration très significative et face aux enjeux plus stricts du bon état ;*
- *comprendre les relations entre les pressions chimiques et l'état écologique dans un bassin où la pression des activités humaine est très forte ; et évaluer les relations pression/état dans le temps ;*
- *comprendre la pression chimique et sa dynamique sur de longues échelles de temps en différenciant les différents facteurs, humains et liés aux milieux physiques qui constituent le bassin.*

*Bien entendu ces axes n'ont pas travaillé de manière indépendante, tant les processus sont interconnectés au sein d'un bassin versant, interconnectés également avec l'ensemble des activités humaines actuelles et passées. Ici repose l'intérêt majeur de maintenir un programme pluri-disciplinaire sur le long terme qui constitue le fondement du développement du programme PIREN-Seine et le positionne au sein du dispositif Zones Ateliers de l'INEE/CNRS.*

*En support à ces actions structurantes, et aussi en raison de leur pertinence propre, plusieurs thèmes transversaux sont développés. Ils nécessitent des développements scientifiques et techniques spécifiques et sont le support indispensables pour le développement des axes de recherche précités.*

*La **modélisation** est un outil majeur du programme. On pense en particulier à la plate-forme Eau-Dyssée (couplage STICS-MODCOU) qui a été le support d'un grand nombre simulations spatialisées qui concernent le fonctionnement hydrologique des nappes du bassin sous la pression des prélèvements, sous l'effet du changement climatique, en incluant les apports d'azote et aujourd'hui de pesticides par les activités de l'homme. Le modèle Senegal, avec les nouveaux développements intégrés dans la plate-forme pyNUTS, s'intéresse à la qualité de l'eau dans le réseau hydrographique, jusqu'à l'estuaire. Il a été couplé avec des modèles du domaine côtier pour des évaluations plus intégrées spatialement. Le modèle ProSe a également bénéficié de nouveaux développements qui ont été validés pour aboutir entre autre à une nouvelle version opérationnelle utilisée pour la gestion de l'assainissement dans l'agglomération parisienne.*

*A côté de la modélisation, un effort constant est consacré au **développement et à l'intégration de bases de données** qui doivent être structurées d'une manière homogène à l'échelle du bassin pour l'ensemble du programme, y compris pour des données cartographiques. Des données secondaires, retravaillées, reconstruites et/ou interpolées sont régulièrement générées, notamment pour l'évaluation des pressions imposées au milieu naturel par les activités humaines, que nous devons être capables d'évaluer à des échelles de temps de plusieurs années pour comprendre les évolutions et pour simuler la qualité des eaux souterraines et des sols. Ces bases de données sont aussi absolument fondamentales pour la caractérisation de l'évolution de l'état écologique du milieu.*

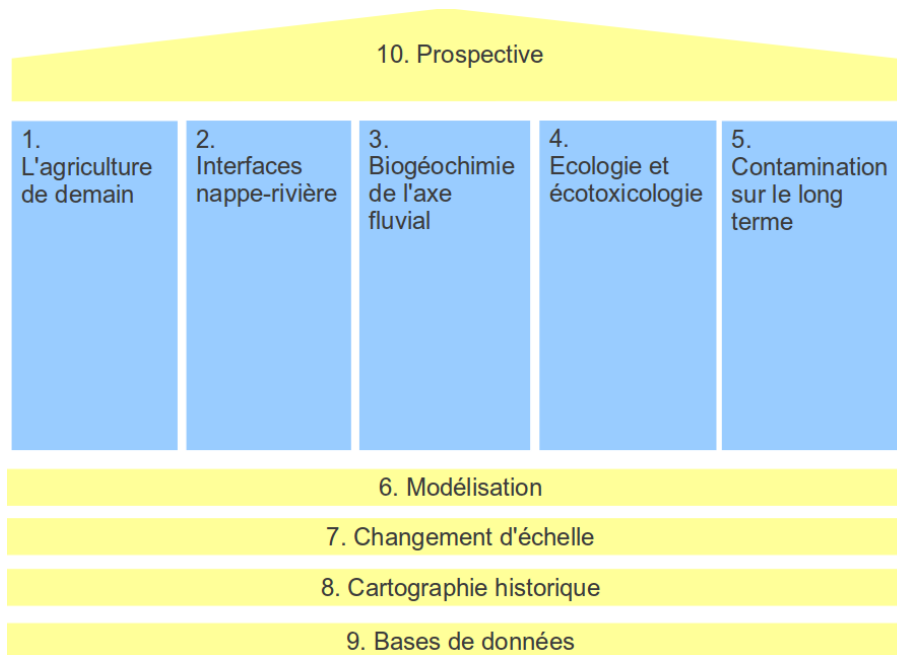
*La **cartographie historique** est à la fois un thème de recherche, quant à la compréhension du contexte et de la signification des cartes, et un outil que nous qui permet de mieux évaluer les pressions anciennes (évolutions morphologique, sources de contamination, usages de la vallée...). L'accent est mis sur cet objet par un thème transversal dédié, en particulier dans l'objectif de constituer le fond cartographique de référence sur le bassin de la Seine que nous construisons en collaboration avec les archives nationales.*

*Le thème transversal **changement d'échelle** présente plusieurs facettes.*

*Du point de vue de la physique et de la modélisation, le problème posé repose sur le fait que les mêmes processus physiques ne peuvent pas être représentés de la même façon selon les échelles auxquelles ils sont simulés. Pourtant la cohérence des simulations doit être garantie et l'usage croisé de la géostatistique et de modélisations plus déterministes permet de résoudre nombre de problèmes. Ces réflexions sur le changement d'échelle portent sur différents sujets développés au sein des axes de recherches du programme, comme la simulation du fonctionnement hydrologique des zones humides ou encore la modélisation de la présence de populations piscicoles.*

*Nous avons abordé la question du « changement d'échelle social » au travers d'immersions dans des*

procédures de gestion locales, notamment deux commissions locales de l'eau et leurs groupes de travail. Il s'est agi de comprendre les logiques des acteurs à l'échelle locale face aux injonctions ou incitations de niveau national ou européen.



Le premier axe cherche à répondre à une question déjà posée de longue date, mais à laquelle aucune réponse appropriée n'a pu être apportée jusqu'à présent, à savoir concilier les exigences de préservation de la qualité des ressources en eau avec celle d'une agriculture économiquement viable et capable de nourrir la population. Les outils et méthodes développés par le PIREN-Seine, sans évidemment apporter « la » solution au problème, peuvent contribuer à l'éclairer, et il nous paraît indispensable de continuer à les développer afin d'améliorer notre capacité à proposer et évaluer des scénarios nouveaux pour l'agriculture dans le bassin et tester leurs conséquences sur les ressources en eau. C'est l'objectif de l'axe de recherche **Agriculture de demain**.

Les modèles développés par le PIREN-Seine ont été utilisés par le passé pour tester différents scénarios basés sur des pratiques agricoles en cours d'implantation dans le bassin. Ils sont constamment améliorés avec notamment l'introduction des pesticides dans le modèle STICS au cours de la phase 6 du programme. Les conséquences de ces pratiques ne sont pas négligeables, mais elles ne permettent guère d'inverser la tendance, notamment pour les teneurs en azote dans les nappes. Il faut donc aller plus loin, et donc se doter des outils pour produire et évaluer des scénarios plus diversifiés, y compris avec de nouvelles pratiques encore en développement (agriculture biologique, biomasse-énergie...), et qui incluent le monde agricole dans son ensemble dont notamment les circuits de transformation et de distribution (émergence des cycles courts, évolution des régimes alimentaires...). Des telles évolutions ont été étudiées et testées au cours de la phase 6 du programme, y compris l'analyse de la transition qui s'intéresse aux modalités, économiques, sociales, juridiques... par lesquelles les pratiques pourraient significativement évoluer.

Le deuxième axe de travail concerne les **interfaces nappe-rivière**, depuis les petites vallées incisées jusqu'au grandes plaines alluviales. Ces secteurs, très actifs d'un point de vue biogéochimique, constituent probablement le lieu principal de rétention des nitrates, rétention qu'on estime équivalente aux flux exportés du bassin de la Seine vers la mer. Ils sont également porteurs de nombreux autres enjeux (biodiversité, aménagements multiples, rôle, non encore démontré à l'échelle du bassin de la Seine, de rétention de pesticides venant des nappes.....). Le programme PIREN-Seine s'est intéressé aux milieux humides par le passé, beaucoup de travaux ayant été réalisés dans le secteur de la Bassée, mais aussi plus récemment à des zones humides plus ou moins artificialisées ou gérées pour réduire la pollution azotée et les pesticides. Nos travaux passés à l'échelle du bassin ont été principalement dédiés à l'établissement d'une typologie morphologique des remplissages alluviaux des vallées et l'établissement d'indicateurs spatialisés destinés à

évaluer le potentiel des zones humides pour un certain nombre de fonctions.

Après un premier couplage des nappes et des rivières dans la modélisation hydrologique à l'échelle de sous-bassins versants d'une certaine taille (Oise, Serein), les travaux de la phase 6 du programme ont permis une intégration plus complète de ces échanges dans la modélisation de l'ensemble du bassin. Par ailleurs des travaux expérimentaux approfondis ont été engagés sur deux sites spécifiques :

- le rôle des Avenelles dans le bassin de l'Orgeval coupe plusieurs couches géologiques, ce qui a permis d'évaluer les échanges entre cours d'eau et nappe dans des contextes différents, et d'évaluer le rôle potentiel d'un cours d'eau sur les transferts de nappe à nappe
- le secteur emblématique et sensible de la Bassée a fait l'objet d'investigations approfondies à la fois en termes d'étude de modélisation du remplissage géologique de la plaine alluviale, et de modélisation hydrogéologique, en s'appuyant notamment sur les travaux menés sur le changement d'échelle.

Le troisième axe de travail concerne la **biogéochimie de l'axe fluvial**. Le PIREN-Seine a longuement travaillé sur ce sujet, ce qui a abouti au modèle RIVE et à sa déclinaison dans l'application RiverStrahler et le modèle ProSe. Une grande partie des processus microbiologiques déterminant la qualité de l'eau y sont décrits en grand détail. Deux raisons principales cependant nous ont amené à revisiter ces travaux : (i) d'une part la qualité de l'eau de surface dans le bassin de la Seine a considérablement évolué au cours des dernières années en raison des progrès de l'assainissement urbain (ii) et d'autre part les exigences en matière de qualité d'eau ont considérablement évolué dans le contexte de la DCE. Ainsi, on est aujourd'hui dans une situation où les exigences vis à vis des modèles sont plus fortes, et où l'attention est portée sur des situations qui n'étaient guère objet d'intérêt lorsque les modèles sont été créés.

Le développement de nouveaux capteurs et systèmes de mesure automatisés et miniaturisés ont permis leur déploiement en Seine en trois stations (projet CarboSeine) pour avoir accès en continu à un grand nombre des variables qui permettent de décrire le fonctionnement biogéochimique d'une rivière (nutriments, carbone organique et inorganique, particules...). Ces travaux ont été menés en étroite collaboration avec le SIAAP qui a apporté un soutien essentiel au projet. L'accès à ces données à très faible pas de temps a permis d'avancer sur deux fronts : (i) d'une part la mise en évidence directe de la dynamique des processus et de leur variabilité, et l'établissement de bilans de fonctionnement trophique (autotrophie/hétérotrophie) en Seine (ii) d'autre part, une meilleure évaluation du potentiel des modèles, et de ce qui les accompagne (variabilité des apports, variabilité hydrologique...).

Les travaux menés au sein de cet axe de travail, intégralement consacré aux sciences de la nature, ont été organisés autour de plusieurs projets, articulés autour du premier d'entre eux qui concerne la mise en place du système d'acquisition et de traitement des données. Des travaux ont été consacrés au devenir de l'azote et en particulier au problème des nitrites dont la présence en Seine constitue aujourd'hui un problème sérieux dans le contexte de l'atteinte du bon état écologique. Des travaux de modélisation à l'échelle du bassin (Seneque) et à l'échelle de l'agglomération parisienne (ProSe) ont été menés à bien pour remettre à jour les modèles et valider leur fonctionnement dans le contexte des pressions actuelles subies par la Seine et son réseau hydrographique. Les progrès réalisés concernent le devenir du phosphore et les croissances algales, le transport des suspensions et le cycle de l'azote. Des travaux concernant la caractérisation de la matière organique dissoute ont été menés dans tout le bassin de la Seine, ils ont permis notamment de mettre en évidence une variabilité significative de la composition (vue par la fluorescence par exemple) entre les principaux axes fluviaux du bassin, alors que la géologie très « circulaire » du bassin et la répartition de l'usage des sols qui l'accompagne.

Enfin, le dernier bloc de travail de cet axe de recherche a été consacré aux organismes pathogènes et en particulier aux virus, grâce à un travail de doctorat co-encadré par l'Université de Créteil et Eau de Paris. Des séries de données d'excellente qualité concernant la présence d'une dizaine d'espèces de virus sensibles, étudiée via leur ADN ou leur ARN, a été produite. Elles montrent la forte conservativité des virus en Seine et permettent d'en identifier les principales sources.

Le quatrième axe de recherche, concernant **l'écologie et l'écotoxicologie**, est une déclinaison sur le bassin de la Seine d'une partie des problématiques liées à l'atteinte du bon état écologique demandé par le DCE.

La première ligne de travaux concerne l'évolution de l'état écologique dans le temps. Elle a été abordée selon deux échelles de temps. L'une, à l'échelle du siècle, permet d'identifier les relations entre certaines variables caractérisant l'état écologique (les populations de poissons pour lesquelles des informations historiques existent) et les pressions exercées sur le milieu, notamment la pression morphologique et humaine telle que nous pouvons la connaître (cartes anciennes, usages des sols, populations humaines....) et la modéliser rétrospectivement. Sur les dernières décennies, les données de populations piscicoles sont beaucoup plus denses et elles ont permis une analyse détaillée de cours d'eau typiques dont les évolutions parfois inattendues reposent la question de l'état de référence. Avec des échelles de temps encore plus courtes, nous nous sommes intéressés également à des projets de restauration écologique menés par différents acteurs dans le bassin de la Seine. Le projet scientifique accompagne le projet de restauration, dans le bassin de l'Orge en particulier (Mérentaise, parc de Chevreuse), un état zéro a été réalisé ainsi qu'une modélisation du potentiel de renouveau des populations piscicoles attendu après l'opération de restauration. Nos équipes continueront de suivre ce type de projets sur le long terme pour les évaluer pleinement à l'échelle de bassins versants, qui sont la bonne échelle pour les évaluer.

A côté de cette approche consacrée aux pollutions piscicoles, la deuxième ligne de travaux a concerné l'évaluation de l'importance de la pression chimique sur l'état écologique. Un travail considérable a été accompli sur trois stations de mesure en Seine (Marnay, Bougival, Triel) qui ont été caractérisées au cours d'un cycle annuel (en 4 saisons). L'analyse de ces sites déjà relativement connus, a été largement poussée :

- avec la caractérisation simultanée du niveau de contamination chimique de l'eau et des sédiments, y compris la spéciation pour certains contaminants, et l'application d'une série de tests éco-toxicologiques représentatifs de différents risques toxiques,
- avec également l'analyse plus approfondie de deux organismes ou groupe d'organismes importants que sont les gammarels et les biofilms, dont le comportement face aux contaminations et en différentes situations saisonnières a pu être étudié en détail.

La base de données générée est extrêmement riche et a fait l'objet d'une synthèse unique.

Le cinquième axe de travail concerne les **contaminations sur le temps long**. Nous y examinerons les divers stocks de contaminants potentiels (sédiments des cours d'eau, dépôts et remblais dans le lit mineur, sols du bassin sous influence de la retombée atmosphérique, et potentielles sources de contamination des bassins versants les plus amont), et les processus dynamiques possibles de transfert de la contamination qu'ils portent.

Le travail a été organisé selon 4 directions principales (i) la circulation et transfert des polluants à l'échelle de trois petits bassins versants (ii) les émissions atmosphériques à grande échelle, les dépôts et la contamination des sols (iii) la dynamique des sédiments dans le lit mineur, et celles des contaminants qu'ils portent et (iv) la contamination à long terme du lit majeur. Dans les trois petits bassins versants l'Orgeval, la Saulx et la Charmoise il s'agissait de cerner les mécanismes de transfert de contaminants depuis l'atmosphère jusqu'à l'exutoire de petits bassins versants (dépôt et exportation de polluants), et de comprendre à cette échelle la rémanence de molécules organiques. A grande échelle, il s'agit d'améliorer les connaissances sur les émissions et transferts atmosphériques et de cartographier la contamination des sols pour évaluer la zone sur laquelle la pression urbaine s'exerce et la disponibilité environnementale des polluants. Les sols sont en partie des reflets des apports atmosphériques, et la relation entre les flux de retombée et la contamination des sols peuvent être interprétés selon différentes clés que sont l'échelle de temps des apports et l'échelle de temps de la contamination.

Dans les sédiments du lit mineur, notre objectif principal était de comprendre les processus de formation/dissolution des phases réactives (diagénèse précoce) dans le sédiment afin d'évaluer le temps de résidence des polluants, en particulier métalliques. Le travail a été focalisé sur des métaux dont le fer, le zinc et le plomb. Dans le lit majeur, notre démarche a été guidée par une méthodologie commune d'étude des stockages sur le long terme dans des secteurs de dépôt de sédiments et le développement d'observatoires tels que ceux proposés sur les petits bassins amont, sans pour autant nous focaliser sur un polluant ou sur une famille de polluants, afin d'assurer la pérennité des méthodologies et l'acquisition de banques d'échantillons, capables de répondre aux questions actuelles mais aussi futures.

*« Au fronton du temple », un atelier de prospective a été prévu avec les partenaires du programme. Il repose naturellement sur les piliers, les travaux menés dans les axes de recherche. Il les nourrit également en apportant des questions clés pour lesquelles les réponses actuelles sont insuffisante et en aidant à la structuration des questions. De nombreux ateliers d'échanges thématiques ont été menés au cours de la phase, mais c'est la prospective agricole la plus avancée. Les autres travaux initialement prévus ont du être décalés (en particulier en ce qui concerne la Bassée) en raison de l'échelonnement des travaux de terrain, très avancés aujourd'hui, mais dont certains sont encore en cours.*

*Les synthèses présentées ici sont organisées en 7 thématiques qui reprennent la structure du programme :*

*Volume 1 : « Quelle agriculture pour demain ? »*

*Volume 2 : « Interfaces nappe-rivières »*

*Volume 3 : « Fonctionnement biogéochimique de l'axe fluvial »*

*Volume 4 : « Ecologie et écotoxicologie »*

*Volume 5 : « Contamination à longue échelle de temps »*

*Volume 6 : « Cartographie historique du bassin de la Seine » et « Changement d'échelle physique et sociale »*

*Nous vous en souhaitons une excellente lecture,*

*Jean-Marie Mouchel,  
pour toute l'équipe impliquée dans le programme*