

La chaîne de modélisation sur le continuum Seine

Le bassin versant de la Seine est un ensemble complexe de socioécosystèmes, qui nécessite de diversifier les approches méthodologiques pour parvenir à le caractériser de plus en plus précisément. Outre le suivi d'indicateurs mené sur le terrain et les analyses faites en laboratoire, le PIREN-Seine s'est ainsi spécialisé, depuis sa création en 1989, dans le développement de modèles de fonctionnement hydrologique, agronomique, biologique et biogéochimique du bassin de la Seine. Grâce à son approche de co-construction avec ses partenaires opérationnels, le PIREN-Seine peut alors proposer ses modèles comme autant d'outils d'aide à la gestion de l'eau.

La diversité des modèles au PIREN-Seine répond historiquement à la diversité des environnements et des enjeux liés à un territoire spécifique ou répondant à un objectif sur le Bassin dans son ensemble. Circulation souterraine, interface nappe-rivière, impact des réservoirs, effets de l'agriculture, assainissement en aval de l'agglomération parisienne ou encore reconquête par les populations piscicoles, chaque modèle développé dans le cadre du programme a permis de mieux comprendre le fonctionnement d'un aspect, d'un tronçon ou d'un compartiment du Bassin selon des points de vue divers.

Mais lorsque les enjeux deviennent globaux, il devient nécessaire de comprendre les flux dans les trois dimensions de l'espace : de l'amont vers l'aval, entre les eaux de surface et les eaux souterraines et enfin le long des cours d'eau. De plus, la compatibilité, le couplage et l'enchaînement des modèles le long du continuum s'avèrent incontournables pour proposer une vision globale du fonctionnement et des trajectoires du bassin de la Seine. C'est tout l'enjeu de la chaîne de modélisation construite par les scientifiques du programme : caractériser l'évolution de la ressource en eau et des milieux aquatiques, de la goutte d'eau de pluie tombant sur une parcelle agricole à l'amont du bassin aux centaines de mètres cubes se déversant chaque seconde dans l'estuaire de Seine, en passant par la circulation des flux dans les aquifères en intégrant l'ensemble des pratiques anthropiques en termes par exemple d'itinéraires techniques agricoles, de filières d'assainissement des eaux ou encore de prélèvement d'eau en rivière et en aquifère.



La phase 8 du PIREN-Seine

Depuis le 1^{er} janvier 2020, le PIREN-Seine est entré dans sa phase 8, qui s'achèvera le 31 décembre 2023 et débutera sa phase 9 en 2024. Pour répondre aux enjeux environnementaux du bassin de la Seine, le programme s'est organisé en 6 axes de travail, qui ont chacun pour objectif de répondre aux attentes des acteurs de gestion de l'eau face aux défis du changement climatique, de la transition écologique de la société et de l'avenir de la ressource. La modélisation des socioécosystèmes du bassin de la Seine est au cœur des recherches du PIREN-Seine. Cette activité a mobilisé plusieurs dizaines, voire centaines, de scientifiques depuis les débuts du programme, soit pour développer des outils ciblés, soit pour coupler ces outils les uns avec les autres au sein d'une plateforme cohérente, qui fait l'objet d'une attention particulière en phase 8.

AXE 1 : Trajectoires du bassin, de ses tissus urbains et agricoles, et de ses territoires.

AXE 2 : Fonctionnement du bassin soumis à des extrêmes hydro-climatiques.

AXE 3 : Construction de la qualité des milieux aquatiques conciliant risques hydrologiques et biodiversité.

AXE 4 : Ambitions et enjeux pour la Métropole en 2024 et après.

AXE 5 : Dynamique des contaminants : de la compréhension des processus au métabolisme territorial.

AXE 6 : Transfert de connaissances et mise à disposition des données.

La chaîne de modélisation sur le continuum Seine



GRAFS

L'approche **GRAFS** (*Generalized Representation of Agro-Food Systems*), développée à l'UMR Metis (CNRS-Sorbonne Université), permet l'analyse des flux d'azote, de carbone et de phosphore à l'échelle de territoires allant par exemple de la ferme au bassin de la Seine, mais aussi à l'échelle nationale ou continentale, via les statistiques agricoles.



STICS*

PeSTICS

→ Le modèle **STICS** (*Simulateur multidisciplinaire pour les Cultures Standard*), développé par l'INRAE depuis 1996, simule les flux sous-racinaires de la parcelle agricole à l'aquifère. Il est couplé avec la plateforme CaWaQS pour pouvoir simuler les flux d'origine agricole vers l'hydrosystème à l'échelle du bassin.

→ **PeSTICS** est un module de STICS qui permet la simulation des flux sous-racinaires des pesticides.



ZOOM SUR Le couplage

La notion de couplage de modèles est essentielle pour comprendre le principe de chaîne de modélisation. Car si chaque modèle répond à des enjeux spécifiques, ils ne sont pas toujours compatibles entre eux. En effet, certains ont besoin de données en entrée ou vont fournir des données en sortie qui ne seront pas intégrables par d'autres. Ainsi, un modèle de flux développé en amont du bassin dans un cadre de compréhension de l'apport des sols agricoles peut se retrouver incompatible avec un modèle de flux développé en aval pour répondre à des enjeux d'assainissement.

C'est pourquoi le couplage doit être envisagé en amont des productions de modèle, comme lors du développement de modules spécialement conçus pour s'intégrer dans une plateforme de modélisation. Cette articulation entre modèles fait l'objet d'un travail spécifique de la part des chercheurs *a posteriori*, pour faire converger des modèles préexistants.

Au PIREN-Seine, le couplage de modèles est un exercice qui implique parfois plusieurs équipes issues d'universités, d'écoles et d'instituts différents, et qui s'appuie sur une des grandes forces du programme : sa longévité. Ainsi, le couplage STICS-Riverstrahler s'est effectué via un ancien modèle du programme, MODCOU, qui est aujourd'hui intégré dans CaWaQS. Grâce à ces emboitements, le PIREN-Seine a ainsi pu modéliser en 2018 la cascade de l'azote dans le bassin, depuis les sols agricoles jusqu'à l'exutoire du bassin, en passant par les aquifères. En 2022, le programme est en mesure de présenter une chaîne STICS-CaWaQS/PyNuts-Riverstrahler, afin de proposer une modélisation complète des flux biogéochimiques à l'échelle du bassin Seine-Normandie.

Interface
nappe-rivière

Vallée



ProSe-PA

→ **ProSe-PA** est un modèle hydrologique développé par Mines Paris - PSL, simulant les flux biogéochimiques de surface des grands axes de rivières. Il est développé depuis 1995, et inclut, tout comme Riverstrahler, le modèle RIVE. Il s'applique à des tronçons de rivière de quelques kilomètres, mais aussi à tout l'aval de l'agglomération parisienne, pour simuler la qualité de l'eau à une résolution de quelques minutes. Il optimise l'exploitation des données de suivi des milieux grâce à ses fonctionnalités d'assimilation de données.

ZOOM SUR Le modèle RIVE

Au début du PIREN-Seine, le processus de la dégradation de la matière organique était représenté par une simple équation cinétique de premier ordre (Streeter et Phelps, 1925). Mais cette dernière ne permettait pas de rendre compte de la nature (micro)-biologique des processus en jeu. En effet, les stations de traitement des eaux usées libèrent des microorganismes, en même temps que de la matière organique et de l'ammonium, qui jouent un rôle direct dans le fonctionnement biogéochimique de la rivière.

Le modèle RIVE est un modèle de seconde génération, prenant explicitement en compte la dynamique des bactéries hétérotrophes, en détaillant les processus liés à l'absorption du substrat. RIVE prend également en compte deux catégories de bactéries nitrifiantes : celles qui réduisent l'ammonium en nitrite et celles qui réduisent le nitrite en nitrate. Le modèle RIVE décrit également la dynamique du producteur primaire principal, le phytoplancton avec trois classes taxonomiques (diatomées, chlorophycées et cyanobactéries) ainsi que deux groupes de consommateurs du zooplancton : les uns à croissance lente - cladocères et copépodes- et les autres à croissance rapides - rotifères.

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

RIVE comprend un module benthique qui simule les échanges en terme de carbone et de nutriments à l'interface eau-sédiment. Les teneurs en oxygène qui résultent des processus de photosynthèse de respiration et de dégradation de la matière organique sont également calculées.

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

Le modèle RIVE entièrement recodé en langage Python et C, est publié sous licence publique générale GNU. (<https://gitlab.in2p3.fr/rive/pyrive>).

CaWaQS

Libwet

- **CaWaQS** (*Catchment Water Quality Simulator*) est une plateforme de modélisation distribuée du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique distribués d'un territoire. Développée par les Mines Paris - PSL, cette plateforme simule les flux souterrains et de surface d'un hydrosystème allant du petit bassin versant à l'échelle régionale, et a la particularité de simuler les échanges nappe-rivière. CaWaQS peut être couplé à STICS pour simuler l'impact sur les eaux souterraines des pollutions diffuses agricoles, mais aussi avec ORCHIDEE pour simuler les flux de chaleur à l'échelle du bassin de la Seine.
- **Libwet** est un module simulant l'interface gravière-aquifère.

ORCHIDEE*

- **ORCHIDEE** est un modèle développé à l'Institut Pierre Simon Laplace. Il permet de simuler les échanges en eau et en énergie entre les surfaces terrestres, les océans et l'atmosphère, mais aussi les processus biogéochimiques et leur interférence avec les activités anthropiques. Son couplage avec CaWaQS vise à simuler des échanges thermiques entre l'atmosphère, la surface du sol et les aquifères.

PyNuts-Riverstrahler

BarMan

- **Riverstrahler** est un modèle simulant les flux biogéochimiques de surface (nutriments et carbone) à l'échelle d'un bassin versant comme celui de la Seine, en prenant en compte la complexité de son réseau grâce aux ordres de Strahler et les flux d'eau qui y sont transférés. Développé à l'UMR Metis (CNRS-Sorbonne Université) depuis le début du PIREN-Seine en 1989, c'est le modèle de flux biogéochimiques de surface le plus complet et présentant le plus grand nombre de couplages à l'heure actuelle. Il peut être couplé à STICS via le modèle CaWaQS ou directement avec GRAFS pour simuler les flux d'origine agricole et effectuer des scénarios. Riverstrahler a aussi été couplé, dans la cadre de collaborations, aux modèles C-GEM (estuaire). Aujourd'hui associé à la plateforme PyNuts, développée également à Sorbonne Université, le modèle PyNuts-Riverstrahler a pu être déployé sur tous les bassins versants de la façade atlantique européenne. Les flux biogéochimiques sont calculés grâce au modèle RIVE également développé en parallèle à l'UMR Metis.
- **BarMan** est un modèle simulant les transferts et transformations biogéochimiques dans des lacs-réservoirs en intégrant également RIVE.

C-GEM*

- **C-GEM** est un modèle simulant de manière transitoire l'hydrodynamique, le transport, et les flux biogéochimiques dans l'estuaire de Seine jusqu'au Havre. Développé à l'Université Libre de Bruxelles, il est couplé avec Riverstrahler pour simuler le devenir des apports du bassin dans l'estuaire.

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



La modélisation : un outil indispensable d'aide à la gestion de l'eau

Des modèles en constante évolution...

La grande longévité du programme PIREN-Seine, dont les équipes mènent leurs études sur le bassin de la Seine depuis plus de trente ans, lui permet aussi de faire constamment évoluer les modèles en y intégrant de nouvelles fonctions hydro-agro-biogéochimiques, et de les rendre plus englobants, mais aussi plus performants grâce à de nouvelles approches par exemple statistiques ou encore d'assimilations de données. C'est ainsi que depuis la création du programme, les modèles historiques ont évolué au gré des couplages tels que STICS-MODCOU vers STICS-CaWaQS ou Sénèque-Riverstralher vers PyNuts-Riverstralher ; et des nouvelles fonctionnalités implémentées, comme le modèle ProSe, enrichi en 2018 pour donner ProSe-P, puis ProSe-PA en 2020.

... et en co-construction

Mais au-delà de l'enrichissement et de l'évolution technique des modèles, le PIREN-Seine interroge également la manière dont ils sont construits. Grâce au regard épistémologique porté par les sociologues de l'environnement, le programme pose la question de l'usage et de l'utilité des modèles dans la construction des savoirs scientifiques d'une part, et dans l'aide à la gestion de l'eau d'autre part. Le programme a ainsi fait le choix de la co-construction avec ses partenaires opérationnels, qui participent ainsi à l'enrichissement des modèles, en y incluant leurs objectifs de gestion ou de politique publique. Une spécificité qui fait la force et la pertinence du PIREN-Seine, en permettant de produire des modèles à la fois précis et robustes dans leur description du fonctionnement du bassin, et utiles dans l'aide à la gestion de l'eau.



Sources bibliographiques : https://www.piren-seine.fr/publications/fiches_4_pages/la_chaine_de_modelisation_sur_le_continuum_seine



Pour plus d'informations, rendez-vous sur www.piren-seine.fr

Contact : francois.mercier@arceau-idf.fr



Crédits photos : PIREN-Seine, photo ci-contre : wikipédia CC Giogo
Edition : ARCEAU-IDF 2022 - www.arceau-idf.fr
Création graphique : id bleue (Sablé) www.idbleue.com

ISSN : 2610-0916

Le **PIREN-Seine** est un programme de recherche interdisciplinaire 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.

Cette fiche est éditée par la *Cellule transfert* du PIREN-Seine, animée par l'association ARCEAU-IDF.

Les partenaires opérationnels de la phase 8 du PIREN-Seine



Les partenaires scientifiques de la phase 8 du PIREN-Seine

