

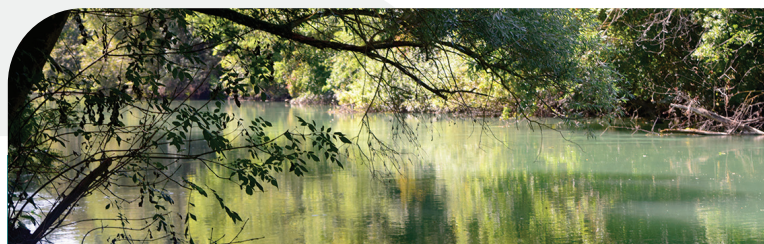


Modéliser les transferts de chaleur pour anticiper les effets du changement climatique dans le bassin de la Seine

L'adaptation au changement climatique est l'un des enjeux majeurs du XXI^e siècle. Dans les prochaines décennies, les tendances déjà observées sur le bassin de la Seine devraient se poursuivre, voire s'amplifier : élévation des températures moyennes, diminution des précipitations estivales, augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes (crues, sécheresses, vagues de chaleur). La gestion durable des ressources en eau dépendra de notre capacité collective à anticiper les effets de ces évolutions. Pour mieux prévoir les réponses du bassin de la Seine au changement climatique, il est indispensable de caractériser les transferts de chaleur entre l'atmosphère et les différents compartiments de l'hydrosystème, et au sein de celui-ci.

Le PIREN-Seine étudie les impacts du changement climatique sur les ressources en eau depuis le début des années 2000. Les recherches s'appuient en particulier sur le développement et l'amélioration de modèles qui permettent de simuler le fonctionnement du bassin de la Seine. Jusqu'à récemment, les flux de chaleur n'étaient pas intégrés à la modélisation. Pourtant, le cycle de l'eau est directement lié à celui de l'énergie : l'eau transporte de la chaleur, la température contrôle les changements d'état de l'eau (évaporation de l'eau des sols et des rivières, évapotranspiration de la végétation, état de saturation des sols, etc.), et elle est l'un des critères de sa qualité physique, chimique. En contexte de réchauffement climatique, l'enjeu est de comprendre comment l'évolution de la température de l'air est susceptible d'affecter celle de l'eau. Ces variations découlent principalement de la dépendance de la température de l'eau à l'égard de paramètres météorologiques divers, incluant le vent, le rayonnement solaire, la température et l'humidité atmosphérique. Parallèlement, les implications du climat induisent également des changements indirects tels que les évolutions des usages de l'eau et des installations de refroidissement ou de chauffage, l'évolution des débits, les variations des niveaux des aquifères et de leur température.

Lors de la phase 8 du PIREN-Seine, des avancées méthodologiques ont permis non seulement d'actualiser le bilan hydrologique du bassin de la Seine, mais aussi de l'accompagner pour la première fois d'un bilan énergétique. En outre, les recherches récentes ont affiné la compréhension de la thermie des rivières, milieux de vie de nombreuses espèces aquatiques et supports de multiples usages. Ces connaissances pourront être mobilisées pour orienter les stratégies d'adaptation au changement climatique. Cependant, la robustesse des résultats dépend largement des données utilisées pour calibrer les modèles, autant sur la température des masses d'eau que sur les prélèvements et les rejets. Pour les recherches futures, il existe donc un enjeu fort autour de la mise à disposition de ces données par les acteurs du bassin.



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. Sa phase 9 débutera en janvier 2025. 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 la 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 température de l'eau est un facteur crucial, influençant divers processus hydrologiques, la qualité de l'eau, les écosystèmes aquatiques, les sols, ainsi que nos activités socio-économiques.

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.



Effet du changement climatique et des usages de l'eau sur la température de la Seine à Paris

La température des rivières est un critère essentiel de leur qualité, contrôlant de nombreux processus physiques, chimiques et biologiques. Elle constitue un facteur limitant pour les espèces aquatiques et notamment les poissons, avec des seuils de tolérance différents selon les familles et les espèces. En outre, la température des cours d'eau conditionne de nombreux usages liés à l'eau. Elle est déterminée par plusieurs facteurs tels que les conditions météorologiques, les caractéristiques du lit de la rivière ou encore le débit. Dans le cadre du changement climatique, il est essentiel de comprendre les liens entre les températures de l'air et celles de l'eau, ainsi que l'influence des activités anthropiques sur le bilan thermique des rivières.

Un réchauffement de la Seine qui devrait se poursuivre à l'horizon 2100

La température des grands cours d'eau comme la Seine est largement influencée par celle de l'air. En effet, la surface de contact entre l'eau et l'atmosphère est importante, ce qui favorise les échanges thermiques. Dans le cadre d'un partenariat entre le PIREN-Seine et la DRIEAT Île-de-France, l'exploitation d'un grand nombre de données historiques a permis de reconstituer la trajectoire thermique de la Seine depuis la fin du XIX^e siècle jusqu'à l'horizon 2100.

Ces travaux ont mis en évidence l'existence d'une relation forte, mais non linéaire entre les températures de l'air et de l'eau. En effet, pour que la Seine se réchauffe, il faut que la température de l'air reste élevée pendant plusieurs jours. Ainsi, au XXI^e siècle, cela s'est produit lors des épisodes de canicule de 2003 et 2006 : la Seine a alors dépassé 27 °C, un phénomène jamais recensé au cours du XX^e siècle. Depuis 2017, le seuil de 26 °C est atteint chaque année. De manière générale, la Seine suit la même tendance au réchauffement que l'air : + 2,5 °C (soit 1,6 °C/siècle) à Paris entre 1870 et 2019.

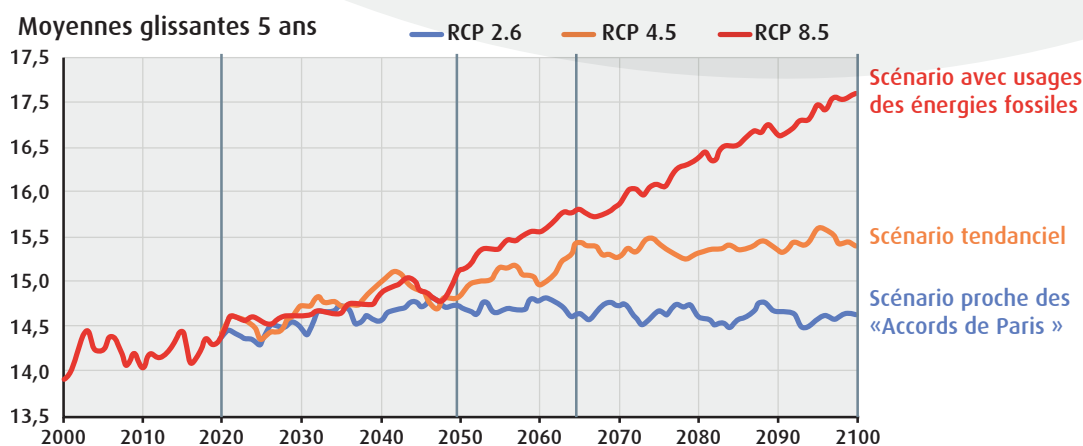
Les projections pour 2100 suggèrent une poursuite de ce phénomène, avec plus ou moins d'intensité selon le scénario

d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre envisagé (RCP 2.6, 4.5 ou 8.5). Le nombre de jours où la température de la Seine dépassera 27 °C (en moyenne journalière) devrait donc continuer d'augmenter, avec des conséquences majeures pour les milieux et les usages.

Des rejets en Seine qui participent largement à son réchauffement

Les échanges avec l'atmosphère ne sont pas seuls à influencer la température de la Seine. Les activités humaines, notamment les rejets (des stations d'épuration, des centrales nucléaires, des déversoirs d'orage, etc.) ont également un impact sur le milieu récepteur. Les scientifiques du PIREN-Seine se sont intéressés à leurs effets sur l'évolution de la température de la Seine lors de sa traversée de l'agglomération parisienne. Tout d'abord, un premier bilan énergétique a été établi à l'interface air-eau entre 2008 et 2012, de Choisy-le-Roi (en amont de Paris) à Poses (en aval). Il permet de caractériser les échanges de chaleur entre le fleuve et l'air, sans intégrer d'autres facteurs. Ce bilan établit qu'en moyenne, la Seine transfère 22 W/m² à l'atmosphère. En effet, le fleuve reçoit 88 W/m² du rayonnement solaire et de l'environnement, mais perd 110 W/m² principalement par évapocondensation. Sur les cinq années étudiées, l'atmosphère a donc eu un rôle légèrement refroidissant sur la Seine, avec des variations selon les saisons.

Si l'on ajoute à ce premier bilan les flux d'énergie issus des affluents, des prélèvements et des rejets anthropiques, le constat est tout autre. La Marne et l'Oise transfèrent respectivement 3016 W/m² et 3490 W/m² à la Seine, tandis que les activités humaines lui apportent en moyenne 546 W/m², soit quatre fois plus que le rayonnement solaire. En prenant ces flux en compte, la Seine stocke en fait de la chaleur à hauteur de 26 W/m². Ainsi, l'impact des activités anthropiques sur le réchauffement du fleuve est loin d'être négligeable, même s'il existe des variations saisonnières.

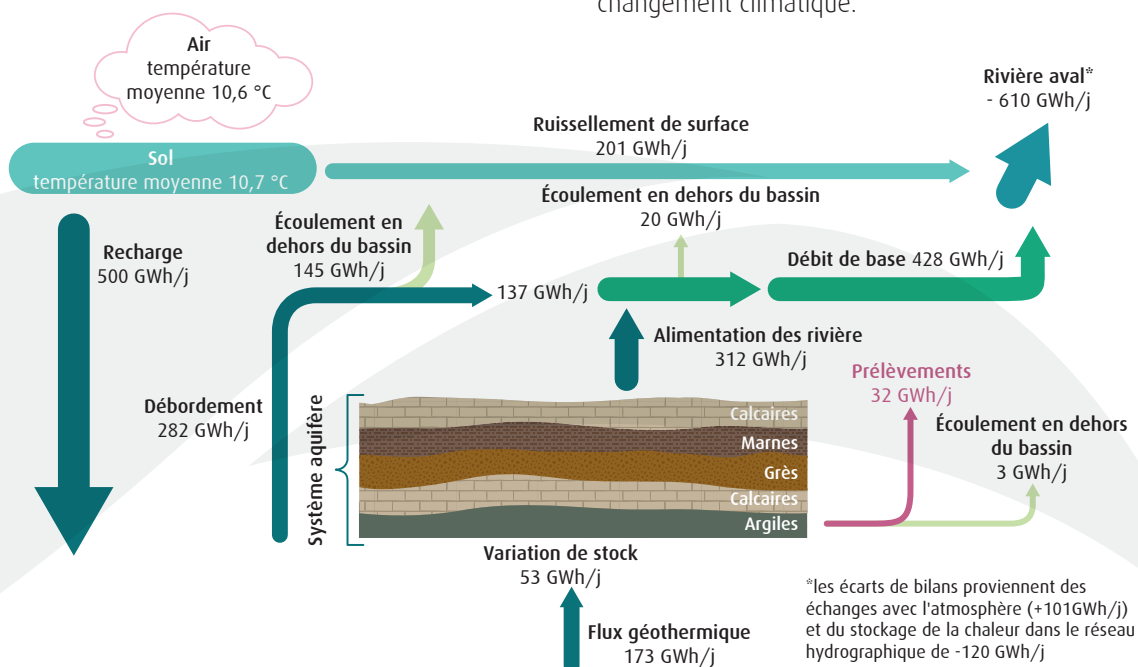


Les transferts d'énergie à l'échelle du bassin de la Seine

Les chercheurs du PIREN-Seine ont développé un outil de modélisation intégrée pour simuler les échanges thermiques entre l'atmosphère, la surface (eaux et sols) et les aquifères, ainsi qu'à l'interface de ces compartiments. Cet outil repose sur le couplage de deux modèles existants : ORCHIDEE (Institut Pierre-Simon Laplace) et CaWaQS (Mines Paris – PSL). Grâce à ces avancées méthodologiques, un bilan énergétique pluriannuel (2001-2018) a été réalisé. Afin de comparer ce bilan aux besoins énergétiques (électricité, gaz, etc.) on exprime la quantité totale d'énergie de ces transferts dans une unité plus accessible : les GWh.

À l'échelle régionale, le bilan thermique du réseau hydrographique est contrôlé par trois facteurs principaux : les échanges avec l'air (60 % du bilan total), les échanges nappe-rivière (27 %) et le ruissellement de surface (13 %).

Le principal apport d'énergie aux rivières est issu du rayonnement solaire, suivi du débit de base alimenté par les eaux souterraines. Les pertes de chaleur se font surtout par transferts vers l'atmosphère et les aquifères, ainsi que par les prélèvements des sociétés pour leurs usages. Les différents termes du bilan thermique varient dans le temps et l'espace. Par exemple, l'effet du rayonnement solaire est modulé selon la couverture végétale des berges et selon la saison. De même, les échanges nappe-rivière peuvent dominer le bilan énergétique à certains endroits, générant des effets locaux de réchauffement en hiver et de refroidissement en été, donc des refuges thermiques pour les espèces aquatiques. Ces résultats soulignent le rôle majeur des eaux souterraines dans la régulation de la température du réseau hydrographique et également des bassins versants amonts (tête de bassin), donc dans la résilience de l'hydrosystème en contexte de changement climatique.



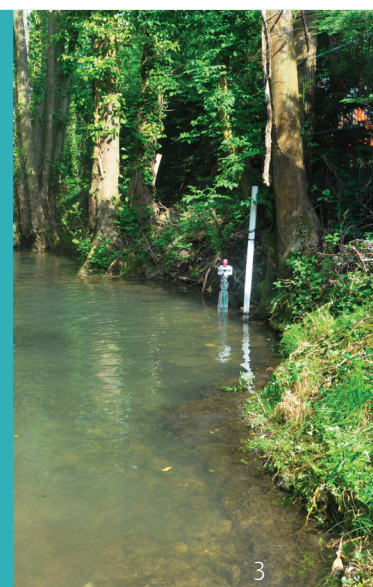
Bilan énergétique du bassin de la Seine et de ses eaux souterraines sur la période 2001-2018 simulé par l'application ORCHIDEE-CaWaQS

Le bassin expérimental des Avenelles

Le bassin des Avenelles est un sous-bassin de l'Orgeval situé en Seine-et-Marne. Sur ce territoire de 46 km², les chercheurs disposent de longues séries de données hydrologiques et thermiques, grâce aux travaux menés par l'IRSTEA puis par le PIREN-Seine. Tous les compartiments de l'hydrosystème (air, rivière, zone hyporhéique, berges, aquifère) sont ainsi instrumentés.

Le bassin a servi de zone d'expérimentation pour le couplage des modèles ORCHIDEE et CaWaQS, nécessaire à l'établissement du bilan énergétique du bassin de la Seine. Les scientifiques ont étudié les réponses de l'hydrosystème à l'élévation de la température de l'air (+ 0,05 °C/an au cours des dernières décennies) et du nombre de jours chauds (> 20 °C), entre 2011 et 2018.

Les résultats indiquent une augmentation de la température des berges et des aquifères de 0,1 °C/an. Il est plus difficile d'établir une tendance pour la rivière, car l'influence des températures de l'air est modulée par différents paramètres tels que l'ombrage (végétation), la largeur du lit ou la hauteur d'eau. Ceci explique les variations spatiales observées entre l'amont, le centre et l'aval du bassin.



Quelles adaptations des usages face au changement climatique ?

Les recherches du PIREN-Seine mettent en évidence les impacts directs du changement climatique et des rejets sur la température des rivières à la traversée de Paris, ainsi que le rôle régulateur des eaux souterraines. Ces résultats peuvent orienter les stratégies d'adaptation des usages de l'eau. Dans cette perspective, le partage des données nécessaires aux travaux de modélisation doit faire l'objet d'une réflexion associant scientifiques et gestionnaires du bassin (chronique de données de température et de données d'usage incluant les débits prélevés ou rejetés et leur température associée).

Face aux enjeux, favoriser la coopération entre usages

Les usages de l'eau et la température des eaux de surfaces et souterraines sont intimement liés, le premier influençant la seconde et la seconde conditionnant le premier. Aujourd'hui, la réglementation relative au couple usages/température de l'eau s'applique aussi bien aux prélèvements qu'aux rejets. Or, avec le changement climatique, les seuils réglementaires risquent d'être régulièrement dépassés lors des périodes de fortes températures et de faibles débits. En plus des conséquences dramatiques pour la biodiversité, il existe un risque de tensions accrues entre usagers de la ressource en eau. Les résultats des modèles doivent permettre de définir des politiques de gestion insistant sur l'interdépendance et la

coopération des usages plutôt que sur leur compétition.

L'importance de la mise à disposition des données pour poursuivre les recherches

Pour arriver à de tels résultats deux grands types de modèles ont été utilisés : statistiques et apprentissage par machine learning (déduction de lois à partir de nombreuses observations) et à base physique (simulation des processus observés par la calibration de nombreux paramètres dans la réalité). Ces modèles nécessitent de disposer de bases de données conséquentes et de bonne qualité, pour être correctement calibrés, mis en œuvre et validés. Or, si toutes les stations hydrométriques et les piézomètres du bassin de la Seine relèvent la température des masses d'eau, ces informations ne sont pas systématiquement conservées par leurs producteurs. De même, les données sur les prélèvements et les rejets ne sont pas toujours faciles d'accès ou de qualité suffisante. Les acteurs du bassin ont donc un rôle important à jouer dans la mise à disposition de ces informations qui permettra aux chercheurs du PIREN-Seine d'élaborer des chaînes de modèles, permettant d'anticiper les impacts directs et indirects du changement climatique sur le bassin. Ces outils serviront ainsi de socle à une réflexion prospective sur la gestion et l'exploitation des ressources en eau.



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

Contact : francois.mercier@arceau-idf.fr



Crédits photos : bandeau couverture : Leswoods1, autres photos : PIREN-Seine

Edition : ARCEAU-IDF 2024 - www.arceau-idf.fr

Création graphique : id bleue (Sablé) www.idbleue.com

ISSN : 2610-0916

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

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

