

Rapport de synthèse

Version du 22 décembre 2023



Volume 4

Transferts de chaleur et températures des eaux du bassin de la Seine

Coordonné par Agnès Rivière



Les partenaires opérationnels de la phase 8 du PIREN-Seine



Les partenaires scientifiques de la phase 8 du PIREN-Seine



Sommaire général

Introduction	1
Evolution des températures de la Seine jusqu'en 2022	7
Simulations des flux d'eau et de chaleur au sein de l'hydrosystème Seine	45
Bilan d'énergie de la Seine à la traversée de l'agglomération parisienne au regard des rejets	71
Projections des températures de l'eau de la Seine à Paris à l'horizon 2100	96

Introduction

Agnès Rivière^{1*} et Nicolas Flipo¹

¹ Centre de Géosciences, Mines Paris, Université PSL

[*agnes.riviere@minesparis.psl.eu](mailto:agnes.riviere@minesparis.psl.eu)

Les rapports du GIEC montrent une augmentation certaine de la température de l'air liée aux changements globaux faisant de l'adaptation au changement climatique 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). Le programme de recherche PIREN-Seine vise à caractériser le fonctionnement des hydrosystèmes en vue d'établir des scénarios prospectifs pour les futurs possibles des ressources en eau. Ces dernières sont sujettes aux influences des changements globaux, comprenant les activités anthropiques et les variations climatiques. Jusqu'à présent, les différentes investigations menées au sein du PIREN-Seine ont apporté des connaissances précieuses sur la dynamique du bassin de la Seine notamment sur l'évolution des bilans d'eau et la qualité des masses d'eau. Toutefois, appréhender les changements de température au sein des divers compartiments de l'hydrosystème de la Seine revêt une importance équivalente, compte tenu de leur impact potentiel sur la dynamique globale du système et la gestion des ressources en eau.

Le lien entre le cycle de l'eau et celui de l'énergie est bien connu et caractérisé : l'eau agit comme un vecteur thermique, transportant la chaleur à travers les différents processus du cycle hydrologique. Réciproquement, la température joue un rôle majeur en contrôlant les changements d'état de l'eau, ce qui impacte directement plusieurs processus hydrologiques du cycle de l'eau tels que l'évaporation, l'évapotranspiration de la végétation et la saturation des sols...

La température représente également un critère de qualité intrinsèque et est ainsi réglementée tant pour la consommation humaine, que pour la protection de l'environnement. La température joue ainsi un rôle fondamental sur la qualité de l'eau en contrôlant fortement de nombreux processus physiques, chimiques et biologiques dans les rivières, dans la dynamique des écosystèmes aquatiques (Caissie, 2006 ; Marmonier et al., 2012 ; Poole and Berman, 2001) mais également dans les sols et dans les aquifères (Bonte et al., 2014 ; Hanasaki et al., 2018). Les changements de température de l'eau affectent les quantités d'oxygène dissous (Matthews and Berg, 1997; Vega et al., 1998), la transformation du nitrate (Ficklin et al., 2013 ; Pan et al., 2021) et également le cycle du carbone (Comer-Warner et al., 2018). Elle influe sur la distribution spatiale des organismes vivants, leur croissance, leur reproduction (Maheu et al., 2016), leur comportement ainsi que leur état sanitaire (Stanford et Boulton, 1993).

Au-delà de leurs effets écologiques, les modifications des régimes thermiques des eaux des rivières et des aquifères peuvent également entraîner des répercussions économiques et sociales significatives. La température de l'eau revêt une importance cruciale dans de nombreux secteurs industriels, notamment pour le refroidissement nécessaire à la production d'électricité ou au fonctionnement des grands bâtiments parisiens, ainsi que dans les processus industriels tels que ceux des papeteries, de l'épuration des eaux usées et de l'approvisionnement en eau potable (Delpla et al., 2009 ; Van Vliet et al., 2013). De plus, elle joue un rôle déterminant dans les performances des systèmes de chauffage géothermique peu profonds en boucle ouverte, leur efficacité étant influencée par la température des eaux souterraines.

Malgré l'importance évidente de la température en tant qu'« indicateur principal de la qualité de l'eau », les efforts passés de gestion des eaux souterraines et des eaux de surface se sont concentrés sur la surveillance et la gestion des débits, des niveaux d'eau souterraine, de la chimie et de la microbiologie (Bonte et al., 2013 ;

Briemann et al., 2009 ; Sutadian et al., 2015). Il n'existe ainsi pas de base de données nationale des chroniques mesurées de températures des rivières et des aquifères. La température des eaux souterraines est influencée par une multitude de facteurs tels que le climat, les propriétés physiques des aquifères, la profondeur des eaux souterraines, les échanges avec les masses d'eau de surface, les infrastructures souterraines (tunnels, réseaux d'eaux usées, drains), les flux de chaleur anthropiques et les processus géothermiques. Les mesures directes de température des eaux souterraines existent, mais sont insuffisamment utilisées. Les principales bases de données citées dans la littérature concernent les zones urbaines et les exploitations géothermiques. Benz et al. (2017) ont montré que la température des eaux souterraines augmente en relation avec l'augmentation de la température de l'air, grâce à l'analyse de 277 chroniques de température relevées en Autriche. En France, il est aussi montré que la température de la nappe de Brie augmente dans un contexte non urbain (Rivière et al., 2018).

Par conséquent, une gestion intégrée des eaux souterraines en termes quantitatifs, qualitatifs et thermiques est essentielle. C'est pourquoi, il a été fait le choix d'orienter une part significative des travaux du PIREN-Seine phase 8 sur cet enjeu majeur. Au cours de la phase 8, les chercheurs du PIREN-Seine ont recueilli des données *in situ* sur le bassin de l'Orgeval (Rivière et al., 2018), alimenté une base de données des températures de la Seine en collaboration avec la DRIEAT, analysé ces données, développé des outils numériques, développé des applications de ces modèles à l'échelle des bassins de la Seine et de l'agglomération parisienne, et finalement évalué l'évolution des températures de la Seine sur 100 ans.

Evolution des températures dans le bassin de la Seine jusqu'à l'année 2022

La base de données des températures des rivières du bassin de la Seine est présentée dans le Chapitre 1. L'exploitation statistique des observations collectées a mis en évidence les liens très forts entre température de l'air et température de l'eau. Les conséquences du réchauffement climatique sont nettement visibles depuis la fin du XIX^{ème} siècle jusqu'à nos jours : la température de l'air à Montsouris a ainsi augmenté de 2,5 °C depuis 1870 soit 1.85 °C par siècle, tandis que celle de l'eau de la Seine à Paris et de la Marne a progressé de 1,6 °C par siècle depuis les années 1870. La température de la Seine dans Paris est plus chaude que celle observée dans les affluents en amont et en aval de Paris. Ceci est lié à l'îlot urbain de chaleur ainsi qu'au fonctionnement hydrodynamique de la Seine dans Paris. Par conséquent, les températures de la Seine sont plus élevées et la durée des vagues de chaleur en rivière est plus importante dans Paris qu'à l'extérieur.

Quantification des flux de chaleur dans le bassin de la Seine et à la traversée de l'agglomération parisienne

Les modèles à base physique permettent de représenter les processus physiques et de quantifier spatialement et temporellement les flux de chaleur associés à ces processus. En vue de quantifier les flux thermiques au travers des différents compartiments, une librairie de transport *libttc*¹ a ainsi été développée et validée (Kiliç et al., 2021). Elle a également été couplée au sein des logiciels CaWaQS² (Flipo et al., 2023a,b) et ProSe-PA³ (Wang et al., 2019, 2022) afin de simuler les températures dans les rivières et les aquifères. Afin de simuler la réponse des eaux souterraines et de surface au changement à l'évolution de la température de l'air, un couplage entre le modèle de transport d'eau et de chaleur entre l'atmosphère et le sol en passant par la végétation (ORCHIDEE, Krinner et al., 2005) et CaWaQS a également été réalisé (Kilic et al., 2023).

Le chapitre 2 se concentre sur les simulations des flux d'eau et de chaleur de l'ensemble de l'hydrosystème Seine. À l'échelle régionale, les trois principales sources d'apport de chaleur au réseau hydrographique sont le rayonnement solaire à ondes courtes (60 % du bilan total), les échanges nappe-rivière (27 %) et le ruissellement de surface (13 %). La principale perte de chaleur est liée à l'évaporation de l'eau.

¹ *libttc* est distribuée sous licence EPL v2.0, téléchargeable sous <https://gitlab.com/gtransp/libttc>

² CaWaQS est distribué sous licence EPL v2.0, téléchargeable sous <https://gitlab.com/cawaqs/cawaqs>

³ ProSe-PA est distribué sous licence EPL v2.0, téléchargeable sous <https://gitlab.com/prose-pa/prose-pa>

Le chapitre 3 se penche sur le bilan d'énergie de la Seine à la traversée de l'agglomération parisienne, en tenant compte des rejets. Un bilan d'énergie pluriannuel 2008-2012 et les bilans d'énergie saisonniers sont établis depuis l'amont de l'agglomération parisienne (Seine à Choisy-le-Roi, Marne à Neuilly-sur-Marne) jusqu'à l'entrée de l'estuaire de la Seine à Poses. Les résultats montrent que les flux de chaleur transitant dans les rivières par les conditions aux limites du modèles sont prédominants par rapport aux rejets anthropiques, eux-mêmes bien plus importants que les échanges avec l'air.

Projections des températures de la Seine à Paris à l'horizon 2100

Finalement, le chapitre 4 met en œuvre plusieurs modèles de *machine learning*, pour prédire les températures de l'eau à quatre stations situées sur la Seine et la Marne sous hypothèses de changement climatique. Les températures moyennes journalières de la Seine pourraient alors atteindre 28 à 30 °C. Cependant, les températures élevées seront observées de manière plus régulière.

Bibliographie

- Benz, S.A., Bayer, P., Blum, P., 2017. Global patterns of shallow groundwater temperatures. *Environ. Res. Lett.* 12, 034005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5fb0>
- Bonte, M., Stuyfzand, P.J., Breukelen, B.M.V., 2014. Reactive Transport Modeling of Thermal Column Experiments to Investigate the Impacts of Aquifer Thermal Energy Storage on Groundwater Quality. *Environ. Sci. Technol.* 48, 12099–12107. <https://doi.org/10.1021/es502477m>
- Bonte, M., Van Breukelen, B.M., Stuyfzand, P.J., 2013. Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production. *Water Res.* 47, 5088–5100. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.049>
- Briellmann, H., Griebler, C., Schmidt, S.I., Michel, R., Lueders, T., 2009. Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems: Ecosystem impacts of groundwater heat discharge. *FEMS Microbiol. Ecol.* 68, 273–286. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2009.00674.x>
- Caissie, D., 2006. The thermal regime of rivers: a review. *Freshw. Biol.* 51, 1389–1406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>
- Comer-Warner, S.A., Romeijn, P., Goody, D.C., Ullah, S., Kettridge, N., Marchant, B., Hannah, D.M., Krause, S., 2018. Thermal sensitivity of CO₂ and CH₄ emissions varies with streambed sediment properties. *Nat. Commun.* 9. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04756-x>
- Delpla, I., Jung, A.-V., Baures, E., Clement, M., Thomas, O., 2009. Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environ. Int.* 35, 1225–1233.
- Ficklin, D.L., Stewart, I.T., Maurer, E.P., 2013. Effects of climate change on stream temperature, dissolved oxygen, and sediment concentration in the Sierra Nevada in California. *Water Resour. Res.* 49, 2765–2782. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20248>
- Flipo, N., N. Gallois, and J. Schuite, 2023a. Regional coupled surface–subsurface hydrological model fitting based on a spatially distributed minimalist reduction of frequency domain discharge data. *Geoscientific Model Development* 16(1), 353–381.
- Flipo, N., Gallois, N., Schuite, J., 2023b, Modélisation couplée de l'ensemble du système aquifère du bassin de la Seine avec CaWaQS : innovations méthodologiques. Dans Flipo, N. (ed), *Trajectoires hydrologiques, passée, présente, et futures du bassin de la Seine*, PIREN-Seine, Rapport de synthèse phase VIII, Volume 3, 2023, pp. 5-44
- Hanasaki, N., Yoshikawa, S., Pokhrel, Y., Kanae, S., 2018. A global hydrological simulation to specify the sources of water used by humans. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 789–817. <https://doi.org/10.5194/hess-22-789-2018>
- Kilic D., Rivière A., Gallois N., Ducharne A., Wang S., Peylin P., Flipo N., 2023. Assessing water and energy fluxes in a regional hydrosystem: case study of the Seine basin. *Comptes Rendus - Geoscience*, 355. DOI: 10.5802/crgeos.165

- Kilic, D., A. Rivière, S. Wang, N. Gallois, and N. Flipo, 2021. Développement du transport de chaleur au sein de la plateforme de modélisation des hydrosystèmes cawaqs. Rapport PIREN Seine. <https://doi.org/10.26047/PIREN.rapp.ann.2021.vol09>
- Krinner, G., N. Viovy, N. de Noblet-Ducoudré, J. Ogée, J. Polcher, P. Friedlingstein, P. Ciais, S. Sitch, and I. C. Prentice (2005). A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles* 19(1), 1–33.
- Maheu, A., St-Hilaire, A., Caissie, D., El-Jabi, N., 2016. Understanding the Thermal Regime of Rivers Influenced by Small and Medium Size Dams in Eastern Canada. *River Res. Appl.* 32, 2032–2044. <https://doi.org/10.1002/rra.3046>
- Marmonier, P., Archambaud, G., Belaidi, N., Bougon, N., Breil, P., Chauvet, E., Claret, C., Cornut, J., Datry, T., Dole-Olivier, M.J., Dumont, B., Flipo, N., Foulquier, A., Gérino, M., Guilpart, A., Julien, F., C.Maazouzi, Martin, D., Mermillod-Blondin, F., Montuelle, B., Namour, Ph., Navel, S., Ombredane, D., Pelte, T., Piscart, C., Pusch, M., Stroffek, S., Robertson, A., Sanchez-Pérez, J.M., Sauvage, S., Taleb, A., Wantzen, M., Vervier, Ph., 2012. The role of organisms in hyporheic processes : gaps in current knowledge, needs for future research and applications. *Ann Limnol - Int J Lim* 48, 253–266.
- Matthews, K.R., Berg, N.H., 1997. Rainbow trout responses to water temperature and dissolved oxygen stress in two southern California stream pools. *J. Fish Biol.* 50, 50–67. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1997.tb01339.x>
- Pan, W., Huang, Q., Huang, G., Xing, L., 2021. Modeling the effects of temperature on the migration and transformation of nitrate during riverbank filtration using HYDRUS-2D. *Sci. Total Environ.* 783, 146656. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146656>
- Poole, G.C., Berman, C.H., 2001. An Ecological Perspective on In-Stream Temperature: Natural Heat Dynamics and Mechanisms of Human-Caused Thermal Degradation. *Environ. Manage.* 27, 787–802. <https://doi.org/10.1007/s002670010188>
- Rivière, A., Flipo, N., Ansart, P., Baudin, A., Marlot, L., 2018. Revue des données de température du bassin des Avenelles. Rapport PIREN Seine. <https://doi.org/10.26047/PIREN.rapp.ann.2018.vol27>
- Stanford, J.A., Boulton, A.J., 1993. Hydrology and the distribution of hyporheos: perspectives from a mesic river and a desert stream. *J. North Am. Benthol. Soc.* 12, 79–83.
- Sutadian, A.D., Muttill, N., Yilmaz, A.G., Perera, B.J.C., 2015. Development of river water quality indices—a review. *Environ. Monit. Assess.* 188, 58. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0>
- Van Vliet, M.T.H., Franssen, W.H.P., Yearsley, J.R., Ludwig, F., Haddeland, I., Lettenmaier, D.P., Kabat, P., 2013. Global river discharge and water temperature under climate change. *Glob. Environ. Change* 23, 450–464. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.11.002>
- Vega, M., Pardo, R., Barrado, E., Debán, L., 1998. Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis. *Water Res.* 32, 3581–3592. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00138-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00138-9)
- Wang, S., N. Flipo, and T. Romary, 2019. Oxygen data assimilation for estimating micro-organism communities' parameters in river systems. *Water Research* 165, 115021.
- Wang, S., N. Flipo, T. Romary, and M. Hasanyar, 2022. Particle filter for high frequency oxygen data assimilation in river systems. *Environmental Modelling & Software* 151, 105382.

Evolution des températures de la Seine jusqu'en 2022¹

Agnès Rivière^{1,*}, William Thomas^{2,**} et Pascal Ung²

¹ Mines Paris-PSL, Centre de Géosciences, Fontainebleau

² DRIEAT Ile de France

* agnes.riviere@minesparis.psl.eu,

** thomas.temperature@gmail.com

Résumé

La température d'un cours d'eau joue un rôle fondamental de la qualité de l'eau en contrôlant fortement de nombreux processus physiques, chimiques et biologiques dans les rivières et dans la dynamique des écosystèmes aquatiques. Les modifications des régimes thermiques des rivières peuvent entraîner également des conséquences économiques et sociales importantes au-delà de leurs effets écologiques. En effet, la température de l'eau est aussi un facteur important pour de nombreux secteurs industriels, tels que le refroidissement de l'eau pour la production d'électricité ou dans les grands bâtiments parisiens, les process industriels comme les papeteries, l'épuration des eaux usées et l'approvisionnement en eau potable, la qualité de l'eau potable. Malgré son importance, la température des rivières a reçu moins d'attention que d'autres propriétés de la qualité de l'eau, elle n'est pas une variable bancarisée au même titre que les nutriments et autres contaminants.

Ce rapport présente la base de données des rivières du bassin de la Seine. Celle-ci a pour vocation à être améliorée par l'ajout de chroniques enregistrées. Tous les capteurs de pression, de hauteur d'eau et de débit sont équipés de capteurs de température afin de corriger ces mesures.

La base comporte actuellement 81 stations et 343 000 températures journalières. La température de l'air à Montsouris a augmenté de 2,5 °C de 1870 à 2022 soit 1,85 par siècle, tandis que celle de l'eau de la Seine à Paris et de la Marne a progressé de 1,6 °C par siècle depuis les années 1870. Les températures sont plus élevées dans l'agglomération parisienne qu'en dehors des zones urbaines. Ceci est principal lié à l'îlot de chaleur urbain et le maintien des débits par les barrages. Il en résulte une température presque constante de l'amont à l'aval lors du passage à travers Paris, avec une légère augmentation en aval.

Les vagues de chaleur riveraines ont augmenté en fréquence de 1990 à 2022, avec les augmentations les plus marquées se produisant au printemps et en été. Nous ne pouvons pas déterminer la date de modification de cette fréquence par manque de données.

1. Pour citer cet article : Rivière. A, Thomas. W., Ung. P., Évolution des températures de la Seine jusqu'en 2022. Dans Rivière. A. (ed), *Transferts de chaleur et températures des eaux*, PIREN-Seine, Rapport de synthèse phase VIII, Volume 4, 2023, pp. 7-43

Points clés

- *La base de données montre une augmentation de la température de l'eau depuis la fin du 19^e siècle ;*
- *Les augmentations de températures sont plus fortes au printemps et en été dans Paris ;*
- *L'îlot urbain modifie la dynamique des températures en rivière, les événements extrêmes sont plus forts dans Paris que dans les zones agricoles.*

Abstract

River temperature plays a fundamental role in water quality, strongly controlling many physical, chemical, and biological processes in rivers and in the dynamics of aquatic ecosystems. Alterations to river thermal regimes can also have significant economic and social consequences over and above their ecological effects. Indeed, water temperature is also a crucial factor in different industrial sectors, such as water cooling for power generation or in large Parisian buildings, industrial processes such as paper mills, wastewater treatment and drinking water supply, and drinking water quality. Despite its importance, river temperature has received less attention than other water quality properties and is not a banked variable in the same way as nutrients and other contaminants.

This report presents the database for rivers in the Seine basin. The purpose of this database is to be enhanced through the addition of recorded timeseries. All pressure, head, and flow sensors are outfitted with temperature sensors to ensure the correction of the measurement.

The database currently comprises eighty-one stations and 343,000 daily temperatures. Air temperature at Montsouris has risen by 1.8°C per century, while water temperature in the Seine in Paris and the Marne has risen by 1.6°C per century since the 1870s. Temperatures are higher in the Paris conurbation than outside it. This is due to the urban heat island and the maintenance of water flows by dams. The direct consequence is a constant temperature from upstream to downstream when passing through Paris, with a slight increase downstream.

Riparian heat waves have increased in frequency from 1990 to 2022, with the greatest increases occurring in spring and summer. We are unable to determine the date of change in this frequency due to lack of data.

Key points

- *The database illustrates a rise in water temperature dating back to the late 19th century.*
- *The most significant temperature elevations occur during spring and summer in Paris.*
- *The urban heat island alters the dynamics of river temperatures, resulting in more pronounced extreme events within Paris compared to agricultural areas.*

Sommaire

Introduction	9
1 Description des données	11
2 Méthodes	16
3 Résultats et discussion	17
4 Conclusion	33
Bibliographie	35

Introduction

La température des rivières (RT) fait partie des mesures hydrologiques les plus anciennes. La date précise de leur début est difficile à déterminer. Sur la base des publications de Cavendish, (1757), Le Comte Morozzo, (1788), et Arago (1858), Mascart (1878), on peut supposer que les premières mesures ont été effectuées en 1734 à Saint-Pétersbourg, puis au début de la seconde moitié du XVIII^e siècle, dans les environs du lac Léman, des sources du Pô et de la Toce, et de plusieurs autres cours d'eau de la région du Piémont. Des mesures régulières ont débuté en Europe et en Amérique du Nord au milieu du XIX^e siècle, parallèlement au lancement des services hydrologiques. La dépendance entre la température de la rivière et la température de l'air, ainsi que sa variabilité spatiale dans les bassins versants, étaient déjà prises en compte à l'époque (entre autres (Humphreys and ABBOT, 1861). Pour diverses raisons, les observations en continu in situ de la RT ont été interrompues, restent incomplètes (enregistrement uniquement en été), ne concerne qu'un petit nombre de cours d'eau autour du globe et ont été réalisées sur des périodes différentes (Webb, 1996). Au milieu du XX^e siècle, l'intérêt des chercheurs pour les régimes thermiques des rivières s'est considérablement accru à la suite de l'augmentation de la température dans la majorité des cours d'eau en raison du réchauffement climatique. Le taux d'augmentation de la température dans l'hémisphère nord au cours des dernières décennies était compris entre environ 0,01 et plus de 0,1 °C par an (Arora et al., 2016 ; Kaushal et al., 2010). Une tendance moyenne de 3 °C par siècle a été déterminée en analysant les données de plus de 2700 stations en rivière en Angleterre et au Pays de Galles entre 1990 et 2006. Une tendance moyenne similaire est observée en Allemagne de 1985 à 2010 sur 132 sites (Arora et al., 2016). Alors que le réchauffement est plus prononcé en été en Allemagne et en France (Moatar and Gailhard, 2006), l'inverse est observé pour le Pays de Galles et l'Angleterre, où le réchauffement est plus prononcé en hiver. Depuis le milieu du XX^e siècle, les températures des rivières ont augmenté (Kaushal et al., 2010 ; B. W. Webb and Nobilis, 2007). Le nombre de vagues de chaleur croissant a également suscité un intérêt en raison de leurs impacts (Jentsch et al., 2007 ; Tang et al., 2023 ; Tassone et al., 2023). Des tendances positives dans les caractéristiques des vagues de chaleur, dont la fréquence (le nombre d'événements par unité de temps), la durée et l'intensité (l'ampleur d'un événement), sont documentées dans les océans et dans les lacs. Ces études n'ont en revanche pas été réalisées sur les rivières.

Les échanges de chaleur entre l'air et la surface de l'eau sont composés du rayonnement solaire, du rayonnement net des ondes longues, latent et sensible. Les composants radiatifs comprennent la majorité du budget énergétique (Caissie, 2006 ; Dugdale et al., 2017 ; Ouellet et al., 2020 ; Webb et al., 2008). La température de l'eau souterraine est également un facteur important, particulièrement près de la source de la rivière ou dans les secteurs où l'infiltration de l'eau souterraine est importante (Caissie, 2006b ; V. Ouellet et al., 2020). Les impacts anthropiques dont l'urbanisation et la canalisation des rivières (Lepori et al., 2015 ; Webb, 1996), le retrait des ripisylves (Johnson and Jones, 2000; Moore et al., 2005), l'utilisation de l'eau pour le refroidissement industriel (Råman Vinnå et al., 2017 ; Webb, 1996, p. 20), ou les apports de l'irrigation agricole ont été observés sur la température des rivières (Caissie, 2006b). Dans l'ensemble, il a été démontré que la majorité des influences humaines affaiblissent la corrélation entre la température de l'air et celle de l'eau (B.W. Webb et al., 2008).

Compte tenu de la rareté des données de surveillance de qualité de la température des rivières, de nombreuses études sont uniquement basées sur des modèles avec peu de stations de mesure, et plus récemment sur des modèles combinés avec des images satellites (Tavares et al., 2020), ainsi qu'avec des approches de *machine learning* (Zhu et al., 2019). Une revue des méthodes de modélisation de la température des rivières a été présentée par (S.J. Dugdale et al., 2017). La précision des résultats de la modélisation de la température des rivières dépend du type de modèle et de son échelle temporelle, ainsi que de la disponibilité des données d'entrée telles que le rayonnement, la température de l'air, les précipitations atmosphériques, les paramètres du régime hydrologique des rivières, la géométrie de la rivière, les échanges entre les rivières et les nappes ainsi que l'occupation des sols et les usages, mais également des données observées de températures en rivière afin de calibrer les modèles (Feigl et al., 2021 ; V. Ouellet et al., 2020 ; Piccolroaz et al., 2016 ; Souaissi et al., 2023). Toutes ces méthodes nécessitent en effet des données de température de rivière afin de les calibrer et les valider.

Les études sur la température des rivières concernent un éventail de plus en plus large de disciplines (notamment l'hydrologie, l'ingénierie, la foresterie, l'écologie, la climatologie, la géographie, la médecine, la sociologie), ainsi que des services responsables de la gestion des rivières et de la détermination des critères de qualité de l'eau (Van Vliet et al., 2012). Ceci se traduit par une augmentation rapide du nombre de publications sur la température de l'eau, qui est passé d'environ 400 en 1991 à plus de 5 000 en 2018 (V. Ouellet et al., 2020). Ces publications analysent les tendances annuelles, mensuelles et saisonnières de la température de l'eau et, récemment, les prévisions de plus en plus fréquentes pour la période restante du XXI^e siècle. Un groupe distinct est constitué d'articles démontrant la dépendance de la température des rivières aux conditions environnementales (Beaufort, 2015 ; Borman and Larson, 2003; Caissie, 2006b ; Gu and Li, 2002; Hannah and Garner, 2015; Liu et al., 2005 ; Michel et al., 2020 ; Mohseni and Stefan, 1999a; Rajwa-Kuligiewicz et al., 2015; Van Vliet et al., 2013 ; B. W. Webb and Nobilis, 2007; Wrzesiński and Graf, 2022; Yang and Peterson, 2017) ainsi que les effets généralement défavorables d'une augmentation de la température des rivières sur la faune et la flore des rivières, et en particulier l'ichtyofaune (S. Bouletreau et al., 2012 ; H. F. Dallas and Rivers-Moore, 2012; Drysdale et al., 2003 ; Halliday et al., 2012 ; Hester et al., 2009; Hester and Doyle, 2011; Isaak et al., 2010 ; D. J. Isaak et al., 2012 ; Jackson et al., 2018) et sur les cycles biochimiques (par exemple, l'oxygène dissous, les flux d'azote et de carbone) (Stumm and Morgan, 1981; Yvon-Durocher et al., 2012).

L'objectif de cette étude est d'analyser la variabilité spatiale des régimes thermiques des cours d'eau à l'échelle de l'agglomération parisienne ; elle contribue ainsi à mieux connaître et comprendre l'état thermique de la Seine. En particulier, elle vise à :

- Collecter de manière exhaustive,
- Qualifier l'ensemble des données de température des cours d'eau disponibles sur la Seine.

Dans ce rapport, nous examinons l'évolution de la température de la Seine et ses principaux affluents à l'aide de 81 stations automatiques depuis l'année 1878 pour la station la plus ancienne jusqu'à nos jours. Cette étude développe la première analyse exhaustive de la température des cours d'eau.

1 Description des données

1.1 Le bassin de la Seine

La Seine est une rivière de septième ordre selon la classification de Strahler (Strahler et al., 1965) (Figure 1). Elle est la deuxième plus longue rivière de France, après la Loire, s'étend sur 776 kilomètres avec une longueur cumulée de 22 400 kilomètres. Le bassin de la Seine draine une superficie de 75 989 kilomètres carrés (65 586 kilomètres carrés à Poses). L'Yonne, la Marne et l'Oise sont les trois principaux affluents de la Seine.

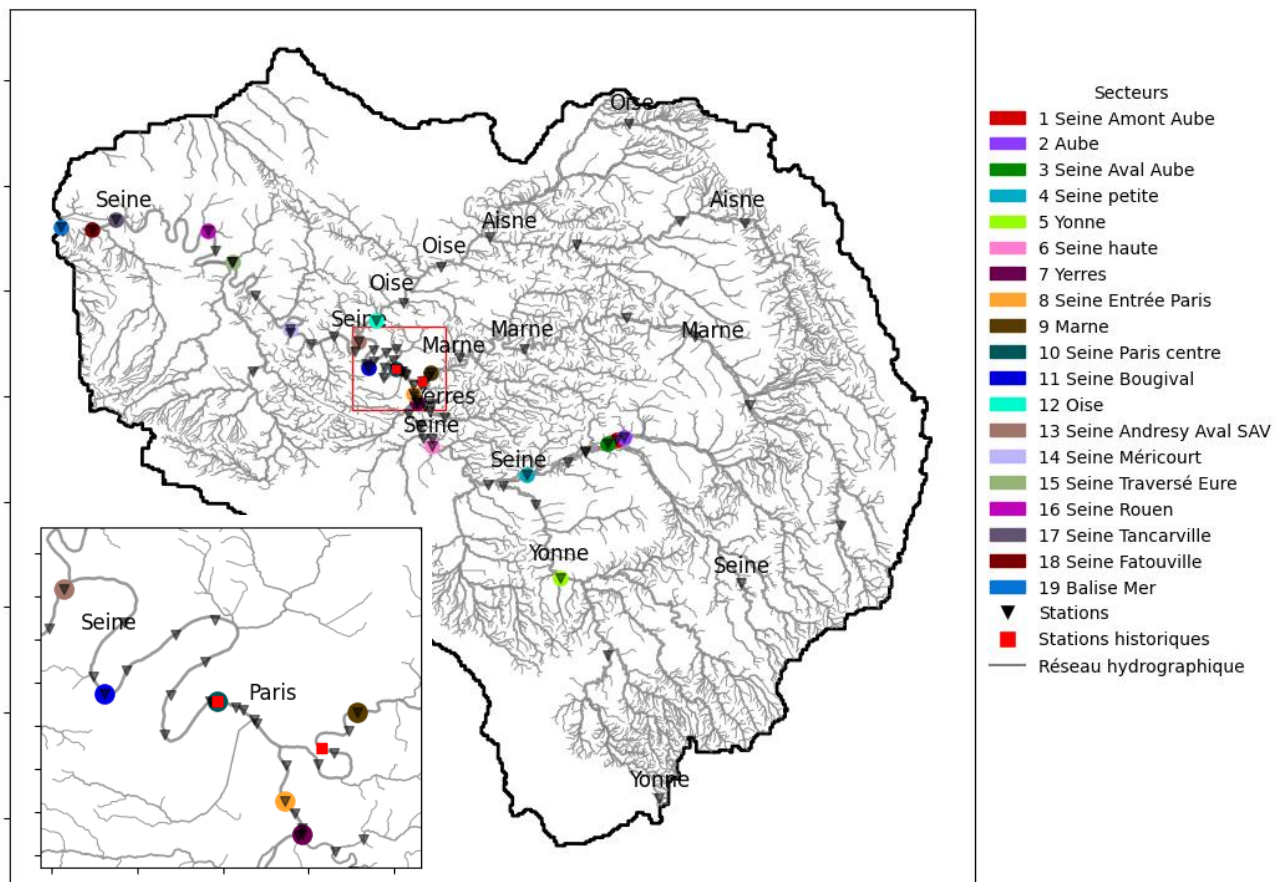


Figure 1: Vue d'ensemble générale de la région du bassin de la Seine ($\approx 76\,375\text{ km}^2$). Les symboles triangulaires représentent les mesures en continu de la température des rivières, les deux points rouges indiquent les stations historiques de la Marne et de la Seine, les secteurs sont représentés en couleur (la longueur de rivière concernée à un usage seulement graphique). Un zoom est présenté sur la zone de Paris.

Le bassin de la Seine subit une pression anthropique considérable, particulièrement marquée lors de son cheminement à travers la région Île-de-France. L'agriculture intensive prédomine, notamment au centre du bassin (Billen et al., 2007), induisant une demande en eau importante, particulièrement durant la saison estivale. La densité démographique est élevée, avec 220 habitants par kilomètre carré en 2016, concentrant 12 millions d'individus dans l'agglomération parisienne, ne couvrant que 16 % de la superficie du bassin. Paris connaît une croissance de sa population urbaine, bénéficiant d'un microclimat

distinct et ayant enregistré récemment des pics de températures estivales élevées.

Les dimensions moyennes de la Seine à Paris sont de 130 mètres de largeur et 4,5 mètres de profondeur. Sa profondeur est régulée pour faciliter la navigation de Romilly-sur-Seine à Poses. Diverses îles et ouvrages de régulation altèrent de manière homogène les propriétés physico-chimiques de l'eau, notamment sa température. Le climat de Paris est principalement doux, avec des étés modérément chauds et des hivers plutôt doux. En 2022, la température moyenne à l'observatoire de Montsouris était de 14,3 °C. Il existe une variation de température d'environ 2,5 °C entre Paris et ses environs, les températures étant légèrement plus élevées en milieu urbain (Figure 2 : Températures moyennes de 1995 à 2004 en Île-de-France Figure 2). Les reliefs artificiels, entourés de structures peu arborées, génèrent en effet un îlot de chaleur urbain documenté depuis 1902 (Annales de l'Observatoire de Montsouris, 1902). Cette différence de température est donc due à une densité de construction accrue, qui entraîne des températures plus élevées à l'intérieur de la ville. Bien que 2,5 °C puisse sembler une différence mineure, dans ce contexte, elle est significative et non négligeable, contrairement à ce que l'on pourrait penser habituellement. 2,5 °C est une moyenne et ne représente pas la dynamique temporelle. La Figure 3 montre la répartition des températures du 7 août 2003, des écarts de 5 °C sont observés entre le centre de Paris et les zones agricoles.

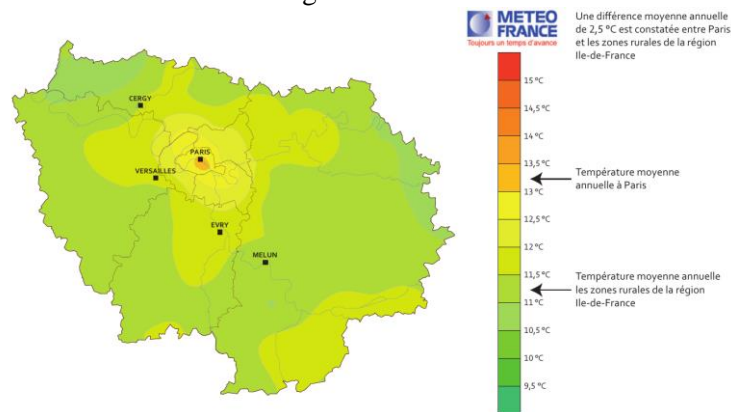


Figure 2 : Températures moyennes de 1995 à 2004 en Île-de-France, source METEO France – DIRIC

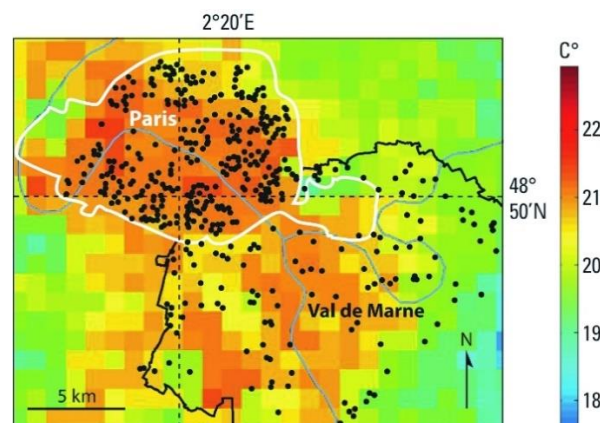


Figure 3 : Distribution spatiale de la température à Paris et dans le département du Val-de-Marne (points noirs) sur l'image thermique NOAA-AVHRR (canal 4) du 7 août 2003 à 4 h 50 UTC. Figure provenant de (Dousset et al., 2007).

1.2 Données de température de la Seine et de ses principaux affluents

1.2.1 Collecte de données auprès d'organismes publics

Actuellement, les données recueillies par 21 institutions publiques partenaires englobent cinq millions de valeurs brutes provenant de 81 stations disséminées dans le bassin de la Seine. Chaque institution a soumis ses propres données dans divers formats, couvrant des intervalles de temps allant de quelques minutes à des pas de temps journaliers. Il était donc impératif de procéder à une vérification et à une consolidation des données en calculant les moyennes quotidiennes, ainsi que, les valeurs minimales et maximales pour chaque journée. Une base de données Access a été sélectionnée pour l'archivage de ces données. Afin de garantir des normes de qualité, plusieurs enregistrements atypiques ont été écartés. Ainsi, la base de données principale utilisée pour cette étude comprend actuellement 343 000 températures moyennes journalières (récapitulées dans le Tableau 1). Par ailleurs, une autre base de données auxiliaire, réunissant les données à un intervalle horaire, est composée de 25 stations distinctes. Sur les 81 stations, seules 43 stations sont encore actives.

Les données historiques recueillies pour la période allant de 1878 à 1938 proviennent des annales de l'observatoire Montsouris, consultables via les sites web de la Bibliothèque nationale de France (BNF) et de Météo-France. Ces enregistrements détaillent les mesures effectuées sur la Seine, collectées le matin à 8 heures depuis différents ponts parisiens (Pont d'Arcole, Austerlitz, et aux écluses de la Monnaie), ainsi que sur la Marne au parc Saint-Maur, deux fois par jour à 8 heures et à 18 heures. Cependant, à la suite d'une réorganisation de Météo-France, ces observations de grande qualité sur les conditions hydrologiques ont été interrompues au début de la Seconde Guerre mondiale. Par la suite, les données ont été recueillies par les gestionnaires d'eau, consignées manuellement dans des registres entre 1940 et 1979, puis stockées dans les premiers ordinateurs des années 1980, soit près de 40 ans plus tard.

Tableau 1 : Liste et description des stations : CMS : Mesure in-situ en continue, MT : Thermomètre manuel, B : Via bache et PPE : Pompage Prise Eau, Statut de la mesure : A= Active, I=Inactive, * station avec un pas horaire

Position	Rivière	Station	Méthode de mesure	Début	Fin	Statut	Nb de données journalières	pK	Strahler
Amont Paris	Réveillon	Réveillon (*)	B	02/01/2008	18/12/2021	A	4043	999,88	2
		Villecresnes (*)	B	01/07/2008	03/10/2013	I	1921	1000	2
	Aisne	Attigny (*)	CMS	23/05/2008	01/06/2015	I	2002	815,72	5
		Balham	CMS	06/07/2012	01/06/2015	I	1061	863,86	5
		Condé-sur-Aisne	CMS	11/12/2008	05/12/2018	I	2045	941,58	5
	Oise	Erloy	CMS	01/07/2008	19/10/2018	I	3161	724,50	4
		Choisy-au-Bac	CMS	10/07/2009	12/05/2020	A	2829	997,38	5
		Pont-Ste-Maxence	CMS	02/07/2008	12/05/2020	A	2300	929,59	6
		Beaumont-sur-Oise	CMS	10/07/2008	31/05/2012	I	932	965,02	6
		Méry-sur-Oise	PPE	31/05/1984	31/01/2022	A	11 197	978,12	6
	Yerres	Crosne	CMS	01/07/2008	16/09/2013	I	1904	997,32	4
		Yerres (*)	B	05/06/2000	30/12/2021	A	6725	999,69	4
		Evry-Gregy (*)	B	04/10/2018	31/12/2021	A	857	970,99	4
	Yonne	Château-Chinon	CMS	14/10/2008	08/04/2015	I	1787	718,56	3
		Prégilbert	CMS	07/10/2010	15/09/2011	I	344	854,02	5
		Joigny	CMS	28/03/2017	10/11/2022	A	2048	917,92	6
		Marolles	CMS	28/03/2017	10/11/2022	A	2048		
	Aube	Saron-sur-Aube	CMS	25/02/2015	09/08/2021	A	1686		
	Petite Seine	Balloy (*)	CMS	25/02/2015	09/08/2021	A	1686	516,09	5
		Conflans-sur-Seine	CMS	03/03/2015	09/08/2021	A	1686		
	Seine	Saron-sur-Aube	CMS	25/02/2015	09/08/2021	A	1686		
		Courceroy	CMS	25/02/2015	09/08/2021	A	1686		
		Grande Paroisse	CMS	25/02/2015	09/08/2021	A	1686		
		Charrey-sur-Seine	CMS	20/10/2008	27/03/2009	I	159	305,72	3
		Balloy	CMS	03/03/2015	26/11/2019	I	1686	516,86	5
		Ponthierry	CMS	05/07/2008	05/06/2015	I	1808	584,14	6
Ponthierry-Sainte-Assise		CMS	21/01/2015	10/11/2022	A	1851	584,14	6	
Nandy		CMS	01/01/2019	31/12/2020	A	717	589,35	6	
Morsang		PPE	01/01/2019	30/12/2020	A	730	594,20	6	
Ablons-sur-Seine		CMS	14/07/2009	31/10/2013	I	1508	614,69	6	

Amont Proche Paris		Evry	B	01/01/2019	30/12/2020	A	730	970,99	4		
Amont Paris	Marne	Riaucourt	CMS	10/06/2008	03/06/2010	I	655	551,65	4		
		Frignicourt	CMS	28/06/2008	14/04/2010	I	610	682,69	5		
		Matougues	CMS	23/06/2008	03/12/2009	A	462	746,67	6		
		Reuil	CMS	23/08/2014	10/11/2022	A	1330	801,31	6		
		La Ferté-sous-Jouarre	CMS	30/07/2009	07/06/2012	I	1044	880,84	6		
		Annet-sur-Marne	PPE	01/01/2007	31/12/2021	A	4576	948,02	6		
Amont Proche Paris	Seine	Vigneux	CMS	01/01/2019	30/12/2020	A	730	616,85	6		
		Orly	CMS	01/06/1999	31/12/2019	A	6966	619,75	6		
		Choisy-le-Roi	MT	04/03/1926	31/12/1938	I	4683	622,45	6		
		Choisy-le-Roi-SEDIF	PPE	17/02/1987	31/01/2022	A	12 468	622,45	6		
		Alfortville-SIAAP (*)	CMS	04/07/2008	01/09/2022	A	4705	626,17	6		
			Alfortville-SNS	MT	01/09/1919	12/07/1921	I	567	626,17	6	
		Marne	Neuilly-sur-Marne	PPE	31/05/1984	31/01/2022	A	12 992	974,98	6	
			Charenton	CMS	10/07/2009	04/11/2011	I	848	978,06	6	
			Parc St Maur	CMS	01/01/1878	31/12/1914	I	13 512	985,24	6	
			Créteil	CMS	06/12/2014	10/11/2022	A	2639	994,30	6	
			Joinville-EauParis	PPE	01/05/1992	18/05/1994	I	395	983,81	6	
			Joinville-METEO	MT	09/11/1925	31/12/1938	I	4795	983,81	6	
			Joinville-SNS	CMS	04/01/1999	01/02/2020	A	6615	983,81	6	
	Paris	Seine	Bercy (*)	PPE	02/01/2003	31/12/2021	A	4555	632,42	7	
			Austerlitz	CMS	01/01/2005	17/10/2019	I	5055	632,88	7	
Austerlitz-SPC (*)			CMS	15/02/2016	10/11/2022	A	2447	632,88	7		
Arcole			MT	11/06/1893	06/11/1910	I	5633	634,75	7		
Monnaie			MT	01/03/1922	01/05/1924	I	762	635,45	7		
Canada (*)			PPE	25/03/2003	31/12/2021	A	4201	637,92	7		
Alma			B	01/04/1993	05/04/2018	A	5735	638,54	7		
Tokyo			PPE	14/04/2015	31/12/2021	A	1851	638,85	7		
Suresnes-SIAAP (*)			CMS	01/01/1995	01/09/2022	A	7706	651,54	7		
				Suresnes-METEO	MT	01/09/1919	31/12/1938	I	6988	651,54	7
				Suresnes	CMS	01/01/2004	31/12/2020	A	6203	651,54	7
				Asnières	CMS	13/06/1995	12/10/2008	I	2092	658,13	7
				Gennevilliers	CMS	14/07/2009	03/10/2013	I	1542	666,06	7
				Colombes	CMS	13/06/1995	01/09/2022	A	4429	671,29	7
				Chatou	CMS	01/01/1995	16/07/2013	I	5101	678,56	7
				Bougival	CMS	01/01/1995	01/09/2022	A	9008	682,63	7
Aval proche Paris			Seine	Bougival	CMS	09/01/1990	31/07/1995	I	1964	682,63	7
				Le Pecq (Croissy)	PPE	21/12/2014	27/11/2019	I	1551	685,03	7
	Sartrouville	CMS		08/06/1995	01/09/2022	A	3633	692,88	7		
	Andrézy	CMS		10/10/2002	01/09/2022	A	6166	706,36	7		
	Poissy	CMS		10/07/2008	16/09/2013	I	1877	711,28	7		
	Meulan	CMS		07/06/2001	01/09/2022	A	2741	727,42	7		
	Porcheville	CMS		01/01/1979	31/12/1979	I	365	739,06	7		
	Méricourt-(Guernes)-RNT (*)	CMS		14/07/2009	08/10/2013	I	1548	752,28	7		
				Méricourt-Energy (*)	CMS	19/05/2000	10/06/2022	A	6983	754,40	7
				Port-Mort amont (*)	CMS	08/07/2021	31/12/2022	A	523	794,82	7
				Poses-RNT	CMS	04/07/2008	03/06/2019	A	2155	835,69	7
				Poses amont-Hydrowatt (*)	CMS	08/07/2021	31/12/2022	A	543	835,69	7
				Poses aval RG-Hydrowatt (*)	CMS	08/07/2021	31/12/2022	A	543	835,89	7
				Oissel (A. Ficht)	CMS	24/02/1967	31/12/2010	I	15 734	863,84	7
				Oissel (HAROPA) (*)	CMS	24/01/2010	06/02/2020	A	3238	863,84	7
				Croth	CMS	01/07/2008	23/10/2022	A	2155	870,96	7
				Rouen (Surface) (*)	CMS	23/02/2018	31/12/2022	A	1653	877,97	7
	Estuaire			Tancarville	CMS	19/10/2015	31/12/2022	A	2548	973,68	7
		Fatouville	CMS	16/10/2015	31/12/2022	A	2582	985,82	7		
		Balise Fond	CMS	13/10/2015	31/12/2022	A	2350	1000,0	7		

1.2.2 Traitement des données

Les valeurs aberrantes ont été exclues de la base de données. Elles peuvent avoir plusieurs sources comme des défaillances occasionnelles des capteurs, une dérive des capteurs, une position du capteur ne permettant pas de le maintenir dans l'eau pendant les périodes de basses eaux ou des opérations de maintenance. Lorsque la température mesurée en rivière est égale à celle de l'air, la donnée de température a été exclue. Nous avons également exclu les valeurs aberrantes dépassant un écart de 20 °C

par rapport à la médiane de la station, ainsi que, les valeurs mesurées avec un écart dépassant 2,5 fois l'écart interquartile (IQR).

1.3 Données météorologiques

Les données des températures minimales, maximales et moyennes de l'air, s'étendant de 1870 à 2023, ont été extraites des enregistrements de Météo France issus de multiples stations réparties dans le bassin (voir Figure 1). Les relevés historiques sont basés sur les données des stations météorologiques de Paris-Montsouris et du Parc Saint-Maur. Les données contemporaines intègrent également les observations : durée et maximum d'ensoleillement, rafale maximale journalière et la pluviométrie.

Le caractère dense du tissu urbain parisien induit la création d'un microclimat local, connu sous le nom d'îlot de chaleur urbain. Ce phénomène induit des variations nocturnes de température avoisinant généralement les 3 °C en moyenne par rapport aux zones rurales avoisinantes. Lors de périodes de canicule, ces différences peuvent s'accroître jusqu'à 10 °C, tel que constaté lors de l'épisode caniculaire d'août 2003, où un écart de 4 à 8 °C a été relevé entre le centre de Paris et les zones moins urbanisées.

L'analyse à long terme du climat parisien met en évidence une augmentation substantielle des températures minimales de l'ordre de 2,3 °C depuis la fin du XIXe siècle, avec une accentuation notable à partir de la seconde moitié du XXe siècle. Parallèlement, le nombre moyen de jours caniculaires est passé de 2 à 12,4 jours par an (au-dessus de 24,5°) et le nombre de jours où la température est inférieure à 1 °C est passé de 28,2 jours à 10,2 jours. Sur la période actuelle, le nombre de jours caniculaires se maintient entre 10 et 20 jours par an.

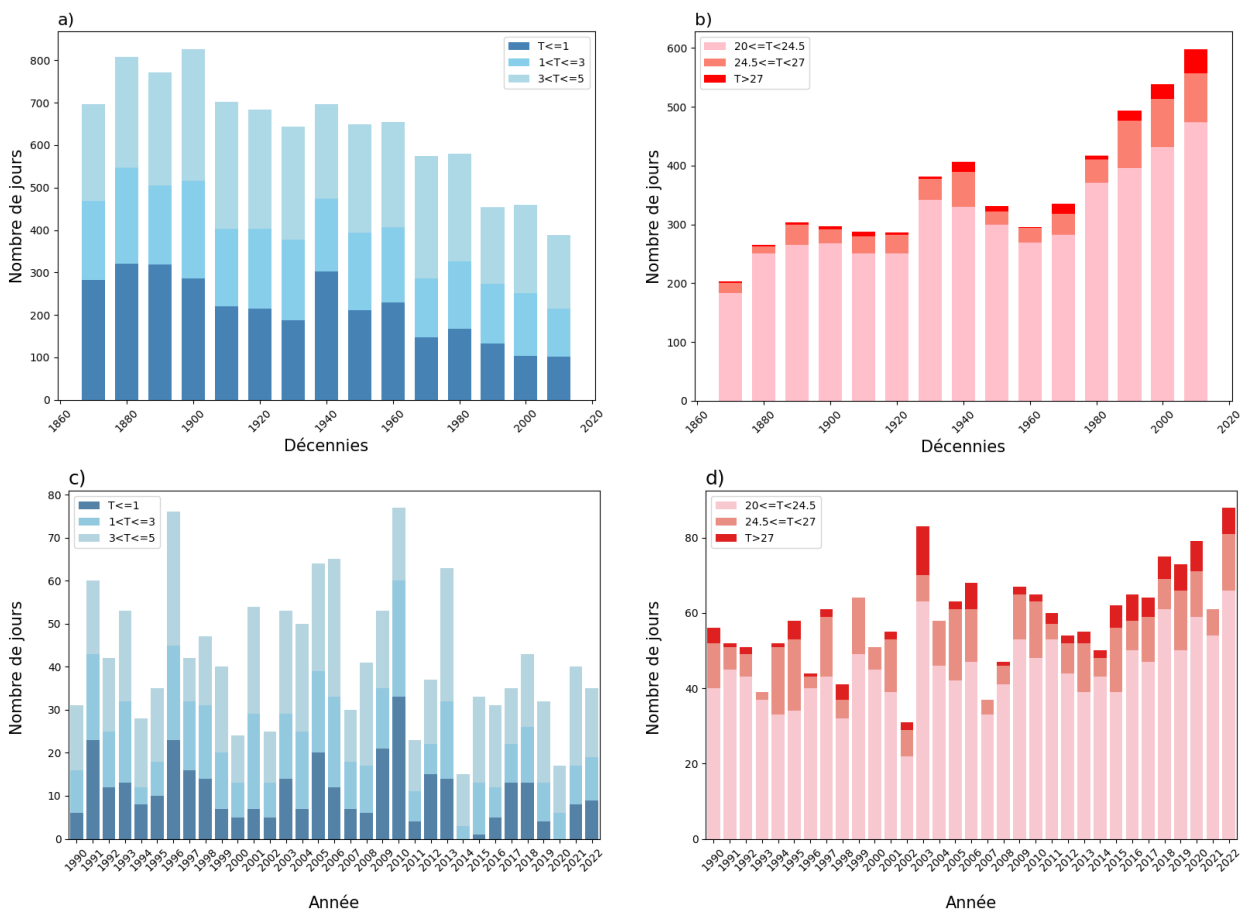


Figure 4 : Nombre de jours par décennie : a) froids et b) chauds, et nombre de jours de 1990 à 2022 : c) froids et d) chauds, valeurs calculées sur les températures journalières de la station Orly

2 Méthodes

2.1 Indicateur pour les acteurs de la gestion de l'eau

Dans cette étude, trois valeurs de température et huit indices de température extrême ont été calculés. Les valeurs de température comprennent la température moyenne quotidienne (TM), la température maximale quotidienne (TX) et la température minimale quotidienne (TN). Les indices de température extrême utilisés dans cette analyse sont basés sur les valeurs extrêmes définies par le GIEC (Alexander et al., 2006 ; Klein Tank et al., 2009 ; Zhang and Feng 2004 ; Zhang et al., 2011), et ils comprennent : les jours chauds (TX90P), les jours froids (TX10P), les jours d'été (SU), la température maximale la plus élevée (TXX) et la température minimale la plus basse (TNN), mais également des valeurs seuils importantes pour l'écologie et l'utilisation de l'eau par les humains (production d'eau potable, production d'électricité, etc.).

En France, l'arrêté ministériel du 2 février 1998 stipule que l'eau utilisée pour le refroidissement ne peut pas être rejetée dans les rivières à une température supérieure à 25,5 °C. Pour les eaux à des fins d'utilisation industrielle ou pour l'eau potable, la plage de température optimale est de 10 °C à 15°. Les températures supérieures à 25 °C engendrent en effet des croissances algales, une augmentation du risque de rupture des canalisations ainsi que la production de sous-produits (THM) dans les processus de potabilisation de l'eau. En dessous de 5 °C, une augmentation de la viscosité accroît le risque de rupture des canalisations et réduit l'efficacité de la coagulation, de la floculation, de la décantation et de la filtration. Ces indices sont répertoriés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Définition des indices des températures extrêmes.

Abréviation	Noms	Définition	Unité
SU	Jours été	Nombre de jours où $TM > 25\text{ °C}$	Jour
WD	Jours froids	Nombre de jour où $TM < 5\text{ °C}$	Jour
FD	Jours froids	Nombre de jours où $TN < 1\text{ °C}$	Jour

Ces seuils de température peuvent être utilisés pour évaluer la sensibilité des rivières aux activités humaines et au changement climatique.

2.2 Vagues de chaleur

Les vagues de chaleur ont été identifiées en suivant la définition des vagues de chaleur marines de (Hobday et al., 2016), définies comme des périodes où la température moyenne journalière de l'eau dépasse un seuil local variant saisonnièrement, équivalent au 90e centile, pour une période ≥ 3 jours. De manière similaire, les vagues de chaleur ont été classées en fonction de leur intensité maximale par rapport à la différence entre le 90e centile et la climatologie à long terme (Hobday et al., 2018). L'identification et la classification des vagues de chaleur ont été obtenues à l'aide du package R "heatwaveR", version 0.4. (W. Schlegel et J. Smit, 2018). Pour chaque vague de chaleur, nous avons quantifié la durée de l'événement et l'intensité cumulée au-dessus du 90e centile. Pour chaque site, la fréquence des vagues de chaleur a été déterminée en tant que nombre annuel d'événements de vagues de chaleur. Chaque événement a été attribué aux saisons météorologiques de l'hémisphère nord (hiver = décembre-février, printemps = mars-mai, été = juin-août, automne = septembre-novembre).

2.3 Sectorisation de données

Les données sont regroupées par zone, dans des secteurs comportant une température relativement constante et peu influencée par les rejets thermiques, similairement aux masses d'eau, qui d'ailleurs sont inadaptées aux continuums thermiques. Chacun de ces secteurs comporte une station de référence complétée par une ou deux stations voisines permettant de combler d'éventuelles lacunes (manque

ou anomalie). Enfin, en cas d'impossibilité d'utiliser une station voisine à la station de référence, les lacunes de données ont été reconstituées par des relations de régression linéaire entre l'air et l'eau selon la même méthodologie que (Beaufort et al., 2020). Les régressions elles-mêmes ne tiennent pas compte des données reconstituées. L'objectif est d'obtenir de longues séries pour chaque secteur afin d'élaborer des statistiques fiables pour chaque secteur. Les secteurs sont positionnés sur la figure 1.

3 Résultats et discussion

3.1 Évolution des températures depuis 1870 des deux stations historiques

Les deux stations historiques de la Seine et de la Marne sont localisées sur la Figure 1.

3.1.1 Tendances annuelles

Les moyennes annuelles des périodes allant de 1870 à 2022 pour ces deux stations historiques sont représentées dans la Figure 5. Elles démontrent une augmentation significative des températures de l'eau dans la Seine et la Marne. Plus spécifiquement, la température de l'air à Montsouris a augmenté de 2,5 °C sur cette période soit 1,85 °C par siècle, tandis que celle de l'eau de la Seine à Paris et de la Marne a progressé de 1,6 °C par siècle. (Figure 5).

Ces observations indiquent une augmentation constante des températures de l'eau tout au long de l'année. À l'heure actuelle, la température de l'eau dépasse même celle de l'air, avec une différence de 1 °C pour la Marne et de 1,5 °C pour la Seine.

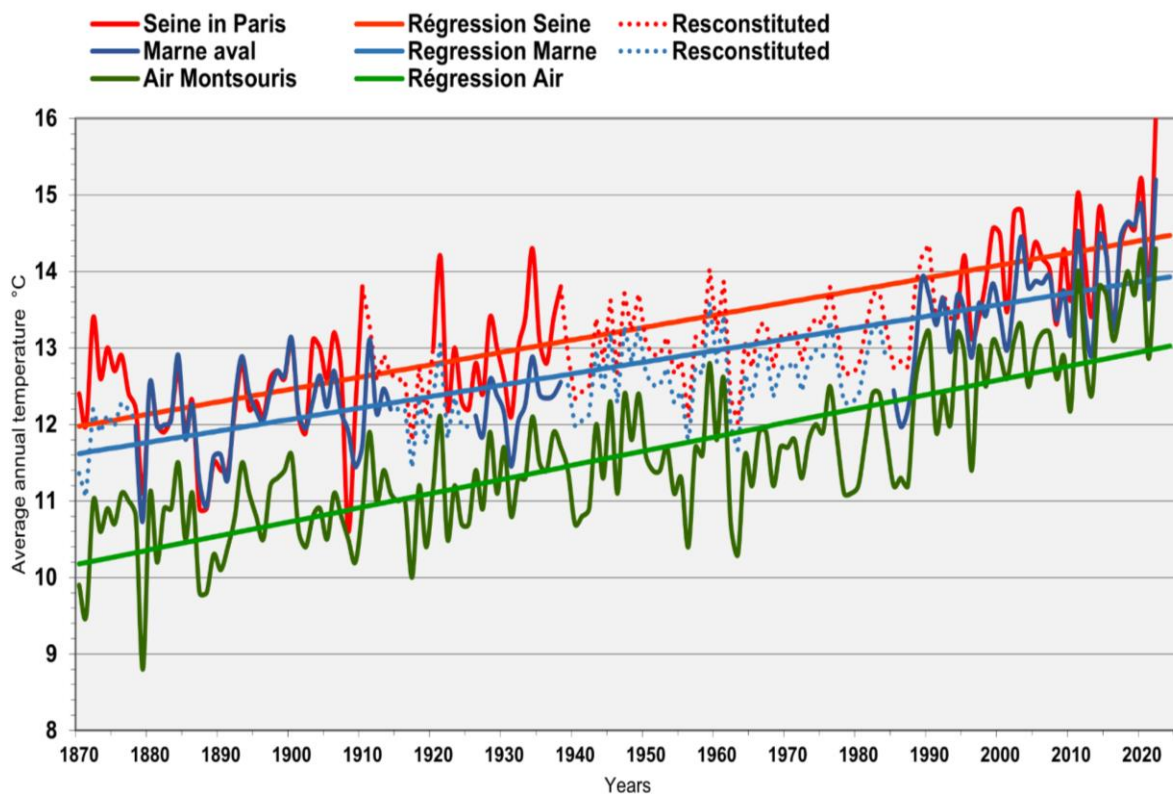


Figure 5 : Températures annuelles moyennes de l'eau pour la Seine à Paris, la Marne, et température de l'air à Paris-Montsouris

3.1.2 Évolution des régimes thermiques

La Figure 6 présente le régime thermique saisonnier de la Seine, calculé à partir des données de la station de la Seine à Paris pour les périodes 1870-1901 et 1995-2019 et de la Marne de 1878-1938 et 1984-2022. Les mesures effectuées à Paris indiquent qu'en moyenne, la température de l'air (T_a) a augmenté de 2,3 °C entre les périodes 1893-1938 et 1993-2022 (basé sur les températures journalières). A Paris, l'amplitude de variation de la température est plus forte qu'au niveau mondial sous l'effet de l'îlot urbain. Ces variations saisonnières de la fin du XIX et XXI siècle de la Seine à Paris, montrent des écarts journaliers qui varient entre 2 et 4 °C pour l'air, dépassant 2 °C pour la Seine et 3 °C pour la Marne, notamment en hiver. Les écarts des moyennes annuelles entre ces deux périodes (en rouge) sont : 2 °C pour l'air, 1,8 °C pour la Seine (d) et 1,5 °C pour la Marne (f). Les plus faibles augmentations de T_a à Paris se produisent en été (juillet) et au début de l'automne (octobre), tandis que les plus importantes se produisent en novembre-janvier et d'avril-mai à octobre. En général, les tendances saisonnières des mesures de T_w et les variations entre les données du XIXe et du XXIe siècle sont cohérentes avec les mesures de T_a , avec quelques déphasages et variations d'amplitude (Figure 6). Il est important de noter que les augmentations de la température de l'eau les plus importantes ont lieu au printemps et en hiver.

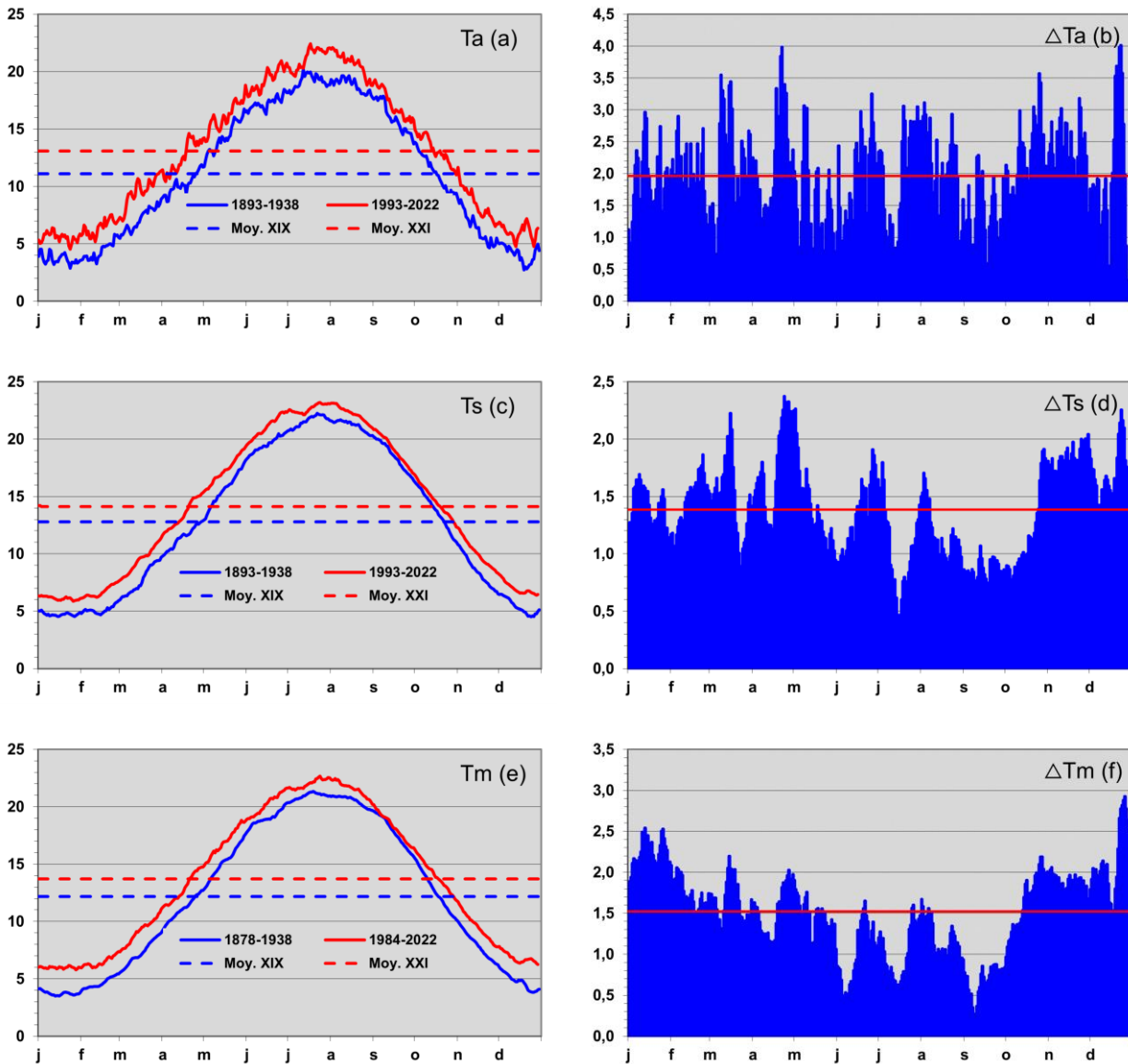


Figure 6 : Variations journalières moyennes de la Température de l'air à Paris-Montsouris (T_a), de l'eau de la Seine à Paris (T_s) et de l'eau de la Marne (T_m) (a, c, and e) selon deux périodes : historique (1893-1938) et contemporaine (1993-2022) et écart journalier des deux périodes (b, d et f).

3.1.3 Les températures saisonnières

La température de l'eau de la Marne et de la Seine sur la période actuelle augmente, marquée par un déplacement de la fonction de densité de probabilité vers la droite, ce qui signifie davantage de températures chaudes pour toutes les saisons.

Au printemps, la T_m du 10e percentile augmente entre la période actuelle et les périodes du XIXe siècle (Figure 7), ce qui est cohérent avec la forte augmentation de T_m chaudes pour cette saison. Des changements dans la queue des températures froides de la distribution de T_m sont également observés indiquant une diminution d'événements très froids. La Figure 7 montre également que la température correspondant au 90e percentile (q_{90}) augmente au printemps.

En été, les moyennes de T_m augmentent, la fonction de densité de probabilité est moins aplatie et déplacée vers la droite (Figure 7).

En automne, de la même manière que pour les autres saisons, les T_m augmentent, les températures froides sont moins froides et les températures chaudes sont plus susceptibles de se produire.

En résumé, les plus grands changements de température apparaissent au printemps et en été. Le printemps montre une forte augmentation des températures, mais les indices climatiques montrent moins de changements en raison de la variabilité, permettant la présence ponctuelle de T_m froids. En été, les températures augmentent fortement ; les extrêmes chauds sont ainsi plus fréquents. En automne, les extrêmes froids diminuent en raison de l'augmentation des T_m .

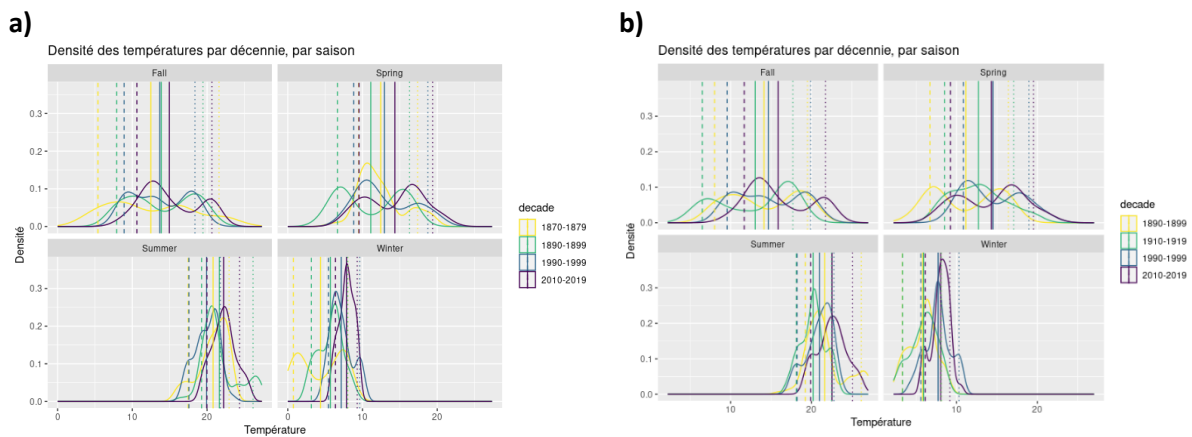


Figure 7 : Fonction de densité de probabilité (PDF) pour les températures saisonnières journalières par décennie de 1890 à 2020 : a) Station Marne et b) station Seine. La fonction de densité de probabilité représente la répartition des températures journalières pour chaque décennie et par saison, avec les quantiles de 10 % (q_{10}) représentés par une ligne en pointillés, la moyenne par une ligne pleine, et les quantiles de 90 % (q_{90}) par une ligne en pointillés et tirets.

3.1.4 Les périodes extrêmes

La Figure 8 a), indique le nombre de jours froids ($<5^{\circ}\text{C}$) observés par année. Autrefois, la

température de la Seine à Paris **descendait souvent en dessous de 5 °C** et même souvent **en dessous de 1 °C** **durant plus de 30 jours, notamment en 1895**. À cette époque, il n’était pas rare que la Seine gèle, parfois sur plusieurs semaines : des récits depuis le IX^e siècle jusqu’à la moitié du XX^e siècle en témoignent. L’observatoire Montsouris a mesuré -23,9 °C pour l’air le 10 décembre 1879 : la Seine et la Marne restèrent gelées durant un mois ! Cependant, de gros pains de glace (embâcles) ont été observés à la dérive sur l’Oise dans les années 1990. De même, les canaux champenois gèlent encore certains hivers rigoureux, ce qui a justifié l’acquisition de brise-glaces par Voies Navigable de France (VNF). Actuellement, ces périodes froides en Seine sont plus rares. Le seuil de 5 °C s’observe **rarement plus de 50 jours**, et celui de 1 °C ne s’observe quasiment plus. Depuis 1956 la Seine n’a plus gelé à Paris.

La Figure 8 b) indique le nombre de jours chauds (>24 °C). Les périodes chaudes sont aujourd’hui beaucoup plus longues : elles sont **de 45 jours, contre 25 jours au début du XX^e siècle**. De plus, les maxima actuels dépassent 27 °C alors que ce seuil n’était jamais atteint à la fin du XIX^e siècle. Ces changements dans les températures de la Seine à Paris indiquent un réchauffement climatique progressif. Les hivers sont devenus plus doux et les étés plus chauds, ce qui témoigne des effets du changement climatique sur le bassin.

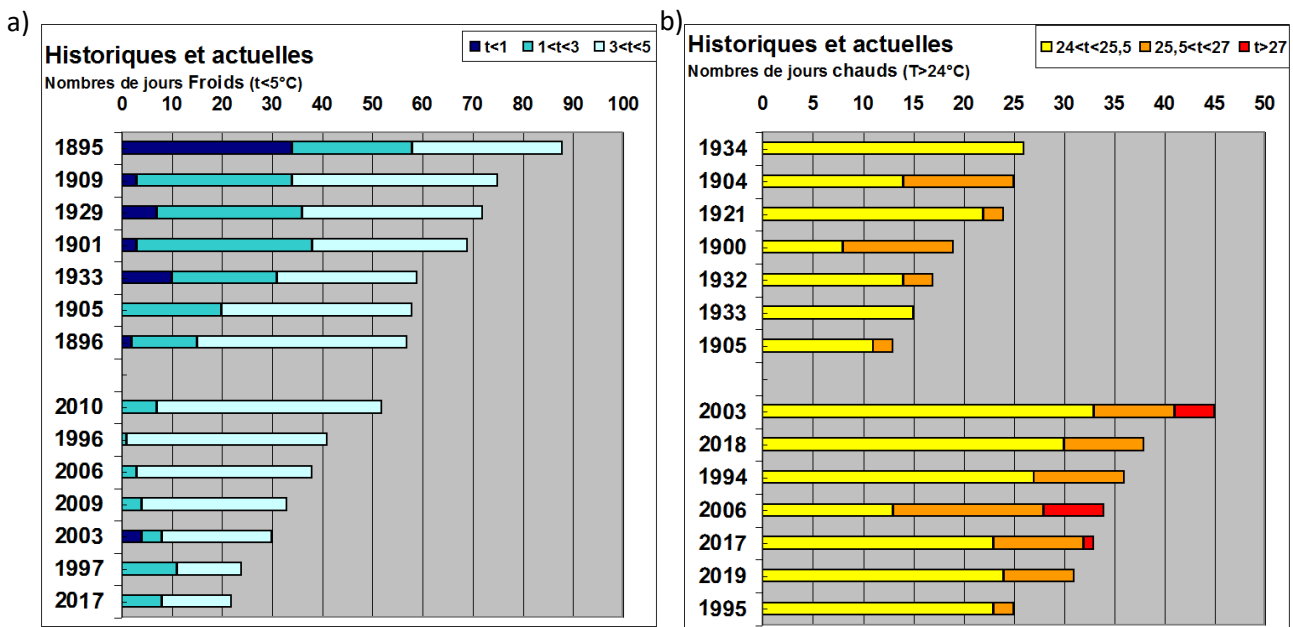


Figure 8 : Températures extrêmes de la Seine à Paris en 150 ans : a) nombre de jours froids à gauche et b) nombre de jours chauds à droite

3.1.5 Les vagues de chaleur

Entre 1893 et 2022, il y a eu un total de 431 événements (320 événements modérés, 100 événements forts, 10 événements sévères et 1 événement extrême) de vagues de chaleur fluviales (sans la période de 1939 à 1980) sur la Marne. La fréquence moyenne, la durée et l’intensité maximale au-dessus du seuil du 90^e centile pour les vagues de chaleur étaient respectivement de 3,9 événements par an pour la Marne et 5 événements par an pour la Seine, avec une durée moyenne de 32 jours pour la Marne et de 39 jours pour la Seine et une intensité maximale moyenne de 7,8 °C, avec un nombre d’événements pouvant aller jusqu’à 10 événements par an pour la Marne et 19 événements par an pour la Seine, une durée maximale de 169 jours et une intensité maximale de 28 °C. Les vagues de chaleur printanière représentent 25,5 % de toutes les vagues de chaleur, suivies par l’été (24,5 %), l’hiver (21,5 %) et l’automne (18,5 %). Le reste des événements interviennent pendant les intersaisons. Entre les deux périodes (1880-1940 et 1990-2022), le nombre d’événements par année a augmenté ainsi que leur intensité. La tendance pour la

période 1990-2022 est une augmentation du nombre d'événements de 0,168 par an (p -value=0.15). Aucune tendance significative n'est en revanche identifiée pour la période de 1880-1940. Le nombre d'événements est plus important pour la Seine que la Marne. Des études plus poussées seront réalisées dans le futur pour expliquer cette différence de comportement.

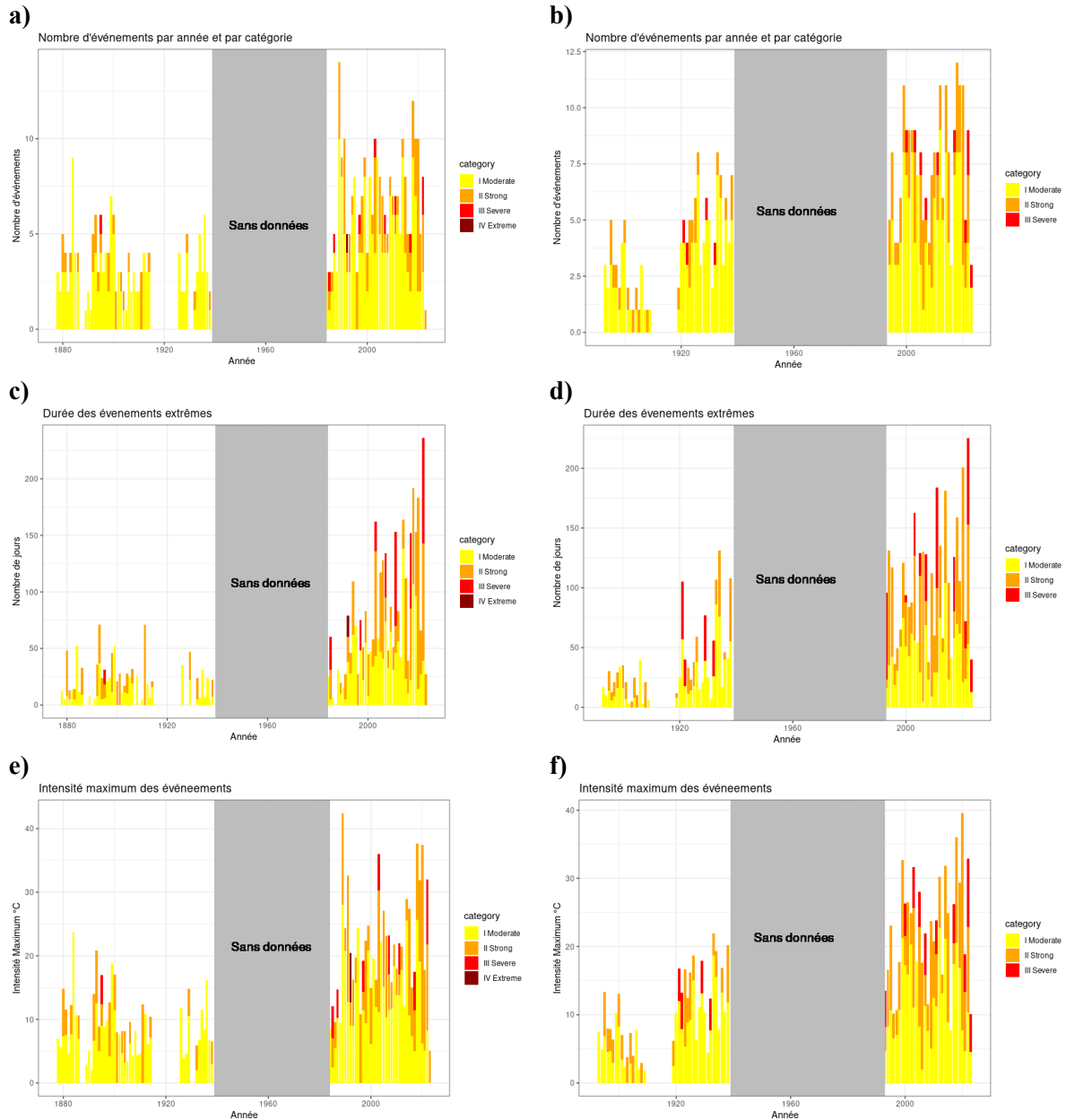


Figure 9 : Classification du nombre total annuel de vagues de chaleur pour a) la Marne b) la Seine, Durée totale des événements par an pour c) la Marne d) la Seine et Intensité maximum cumulée par rapport au 90e centile pour e) la Marne f) la Seine.

3.2.2 Évolution saisonnière annuelle de la température de la Seine

La Figure 11 présente les statistiques interannuelles sur une période de 30 ans (1991-2022) pour la station de Bougival. Les données interannuelles journalières ont permis de déterminer plusieurs éléments clés pour chaque jour sur cette période : le minimum (Min), le quantile 10 % (T10), la moyenne (Moy), le quantile 90 % (T90) et le maximum (Max) des données de température. Ces statistiques offrent une vue détaillée des fluctuations climatiques sur une base quotidienne sur cette période de trois décennies. Ces courbes servent de référence dans la suite de l'étude. Les températures de l'eau ont régulièrement augmenté de 14 à 15 °C au début du mois de février pour atteindre des pics annuels de 23 à 25 °C en juillet. Le refroidissement saisonnier débute en août, et les températures ont chuté à 12-14 °C au mois d'octobre. D'autre part, même lors des saisons les plus froides, les températures ne descendent jamais en dessous de 0 °C, démontrant ainsi une certaine constance et modération thermique dans cette région spécifique de la Seine.

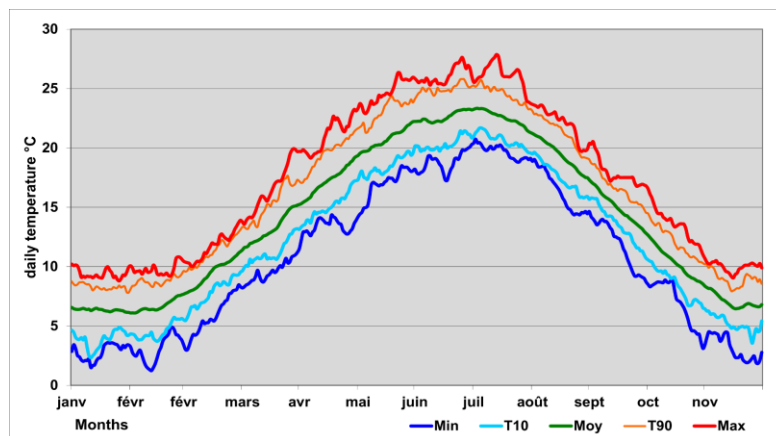


Figure 11 : Statistiques interannuelles sur une période de 30 ans (1991-2022) pour la station Bougival ; minimum (Min), quantile 10 % (T10), moyenne (Moy), quantile 90 % (T90) et maximum (Max).

3.2.3 Les températures minimales

Les Figure 12 et Figure 13 présentent le nombre de jours froids (<5 °C et <1 °C). La fréquence des jours froids, caractérisés par des températures inférieures à 5 °C voire à 1 °C, varie en fonction de la distance par rapport à Paris. Les données indiquent une diminution du nombre de ces jours à mesure que l'on se rapproche de la capitale. Les années affichant le plus grand nombre de jours froids (Figure 12) sont 2010, 2009, 1996, 2006, 2003, 1997 et 2017.

Il convient de noter que dans la plupart des stations, le nombre de jours avec des températures inférieures à 1 °C est extrêmement faible, voire nul, à l'exception des stations situées en dehors de la zone de Paris. Par exemple, dans la région de l'Oise Amont, les relevés enregistrent régulièrement des températures inférieures à 1 °C. Cette spécificité s'explique par la localisation au nord du Bassin et par la distance significative par rapport à Paris, ce qui favorise des températures plus basses.

Par ailleurs, le nombre restreint de jours où les températures descendent en dessous de 5 °C est directement lié à l'influence de l'îlot de chaleur urbain, phénomène typique des zones fortement urbanisées comme Paris. Il n'y a quasiment aucun jour < 1 °C dans Paris et le nombre de jours <5 °C chute à la traversée de Paris.

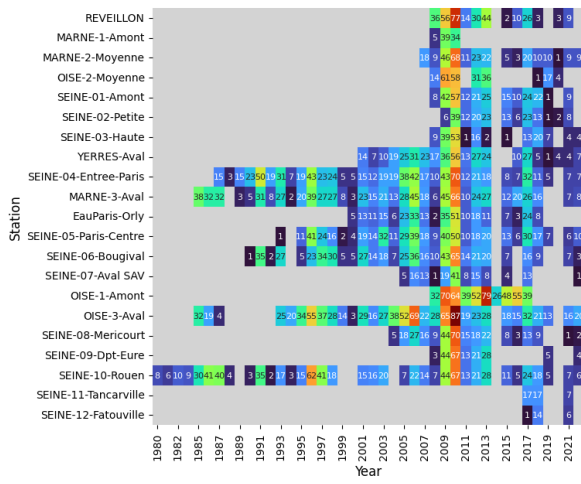


Figure 12 : Nombre de jour où $TM < 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

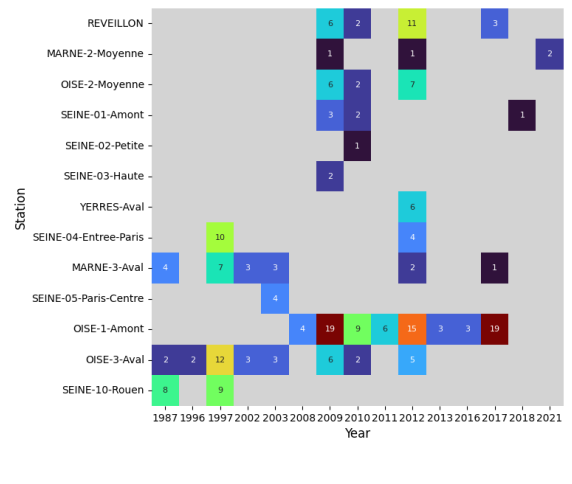


Figure 13 : Nombre de jour où $TM < 1\text{ }^{\circ}\text{C}$

3.2.4 Les températures maximales

a) Canicule de 2003

La canicule 2003 est la plus sévère parmi les observations effectuées depuis 1990, ce qui justifie une étude approfondie. Les graphiques ci-dessous précisent les écarts à la moyenne de référence 1991-2020.

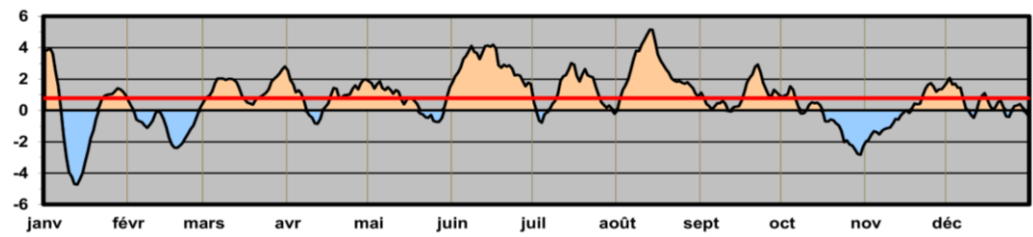


Figure 14 : Température de l'eau de la Seine à Bougival - Déviations par rapport à la moyenne - année 2003 (Réf. 1991-2020).

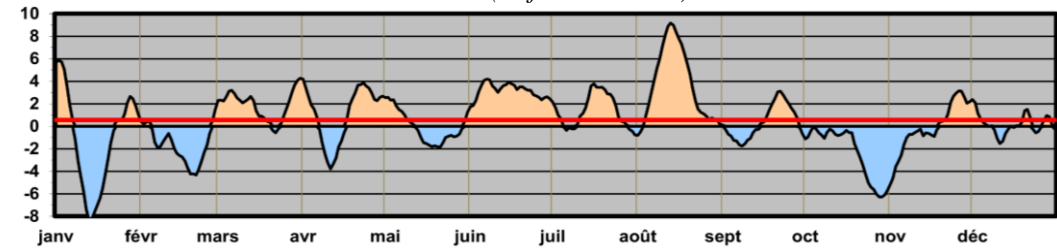


Figure 15 : Température de l'air à la station Orly - Déviations par rapport à (Maximum-Minimum) /2 moyenne lissée sur 10 jours - année 2003 (Réf. 1991-2020).

Les variations de température entre l'eau et l'air sont synchronisées lors des périodes chaudes et froides en 2003 (Figure 15). Les mois de janvier à mars et novembre ont été généralement froids, tandis que le reste de l'année a connu des conditions très chaudes le long de la Seine. En août, la température a atteint un maximum instantané de $28\text{ }^{\circ}\text{C}$, avec une moyenne sur trois jours consécutifs de $27,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sur l'ensemble de l'année, 275 jours ont dépassé la moyenne interannuelle. L'écart entre la température de l'eau en 2003 et sa moyenne annuelle a été de $+0,81\text{ }^{\circ}\text{C}$, tandis que celui de la température de l'air s'est élevé à $+0,56\text{ }^{\circ}\text{C}$.

b) Variation spatio-temporelle de la température

Dans cette section, deux indicateurs écologiques basés sur la température de l'eau sont présentés. Le premier est le nombre de jours par an où la température journalière du cours d'eau dépasse 25 °C. Les rivières ayant atteint ce seuil au moins une fois par le passé sont représentées dans la Figure 16. Il y a eu une augmentation notable des événements d'eau chaude au cours des dernières années. Les années extrêmes de 2003, 2006 et 2022 sont clairement mises en évidence. L'eau des rivières du bassin de la Seine est sensible et très exposée à ces événements de température extrême avec le changement climatique en cours. Le nombre de jours estival (température journalière >25 °C) augmente avec la proximité de Paris (Figure 16). Le deuxième indicateur écologique est le maintien d'une température maximale

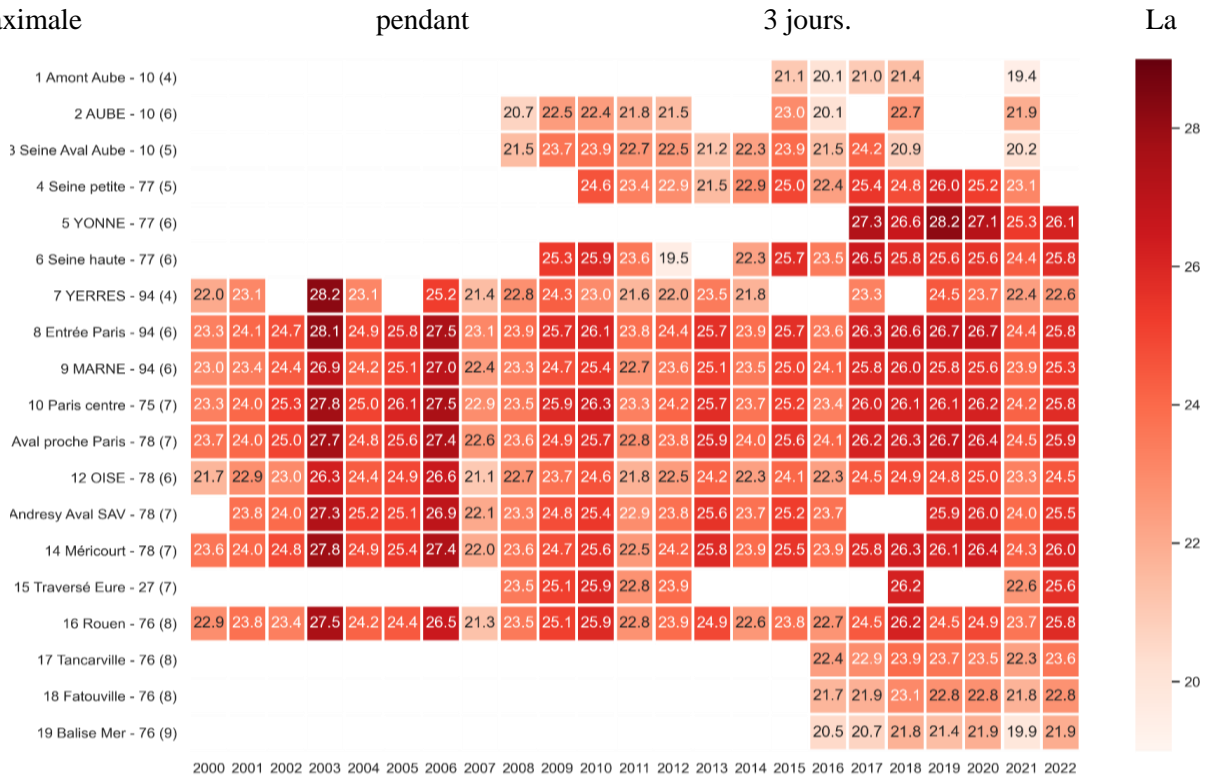


Figure 17 indique les moyennes maximales sur 3 jours consécutifs de l'amont de l'Aube jusqu'à la mer. Elle met en évidence les années les plus chaudes notamment 2003, 2006, 2018 et 2022 et les secteurs les plus chauds comme Paris intramuros. En amont de l'Yonne, la Seine est plus fraîche. L'Yonne, elle, venant du sud du bassin est plus chaude. Au contact de la mer plus fraîche, la Seine se refroidit dans son estuaire en aval de Rouen. Il est encore une fois important de noter que les valeurs de la température de la Seine dans Paris restent constantes de l'amont (Entrée Paris) à l'aval (Bougival) avec une légère augmentation à l'aval.

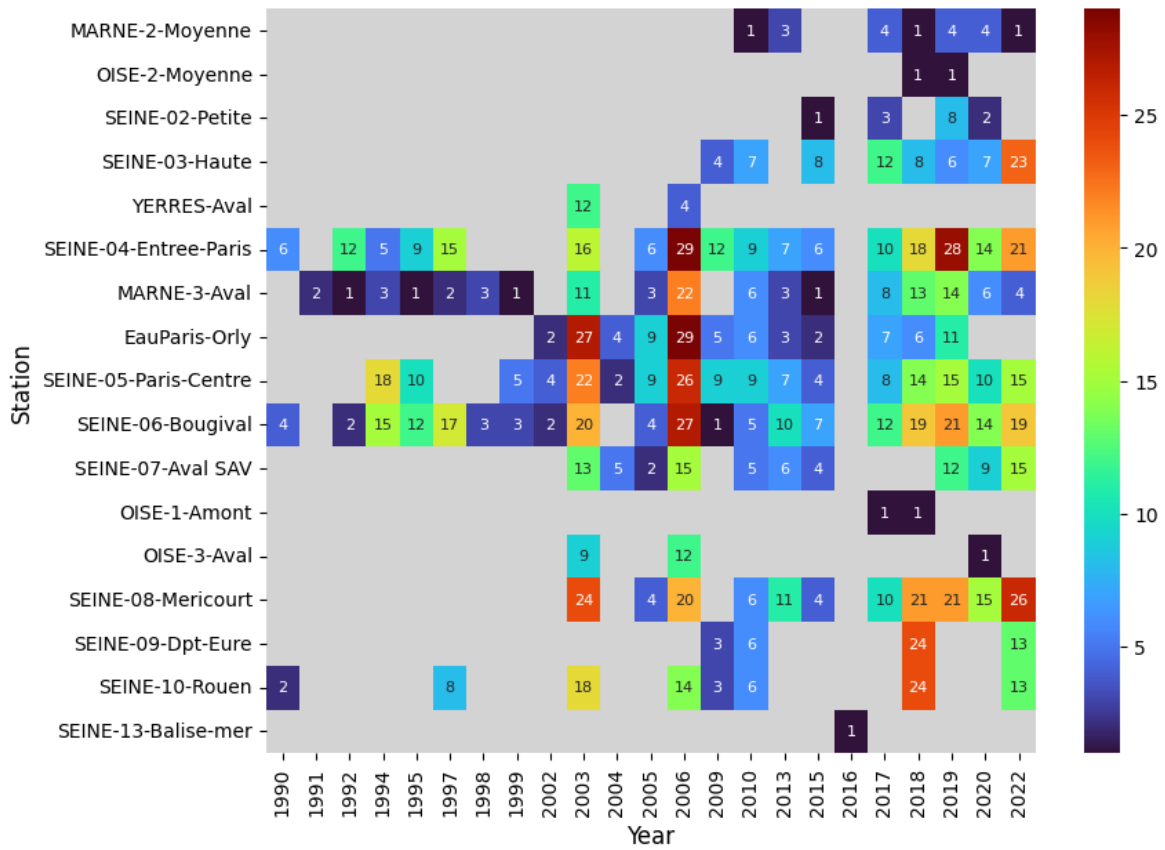


Figure 16 : Nombre de jours par an où le seuil de 25 °C a été atteint pour les stations de l’amont vers l’aval du bassin de la Seine (c’est-à-dire lorsque la température journalière de l’eau est supérieure à 25 °C). Les abréviations des noms des stations sont expliquées dans le Tableau 1.

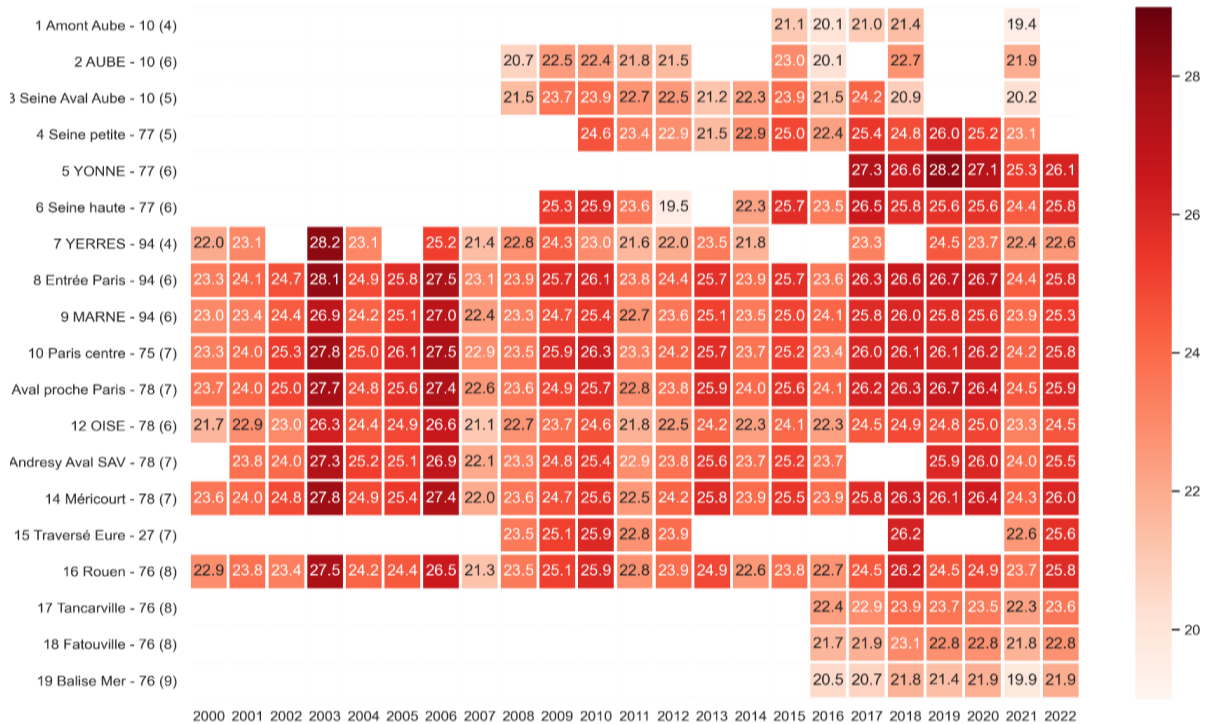


Figure 17 : Maximum de la moyenne sur 3 jours consécutifs pour chaque secteur classifié de l’amont vers l’aval de l’axe Seine, avec le nom, le département et l’ordre de Strahler entre parenthèses.

Les séries chronologiques et les diagrammes en boîte à moustaches pour les valeurs de température en juillet, août et septembre (TM, TX et TN) de la Seine à Bougival de 1990 à 2023 sont présentés dans la Figure 18. La TM a atteint des maximums en 2006, 2019 et 2022 et une valeur la plus basse en 2001 pour le mois de juillet. La TM a fluctué avec une alternance de valeurs élevées et faibles. Une remarquable tendance à la hausse de la TM s'est produite à partir de 2017. Parmi les températures moyennes de la Seine à Bougival observées en août depuis 1990, trois années se détachent particulièrement : 1997, 2003, 2018 et 2022 (Figure 18 b.). On peut aussi constater une accélération des hausses depuis le début du XXI siècle. Parmi les températures moyennes mensuelles de la Seine à Bougival observées en septembre depuis 1990, l'année 2023 est supérieure de 1 °C au précédent record observé en 2011 suivi de l'année 1991 (Figure 18 c.).

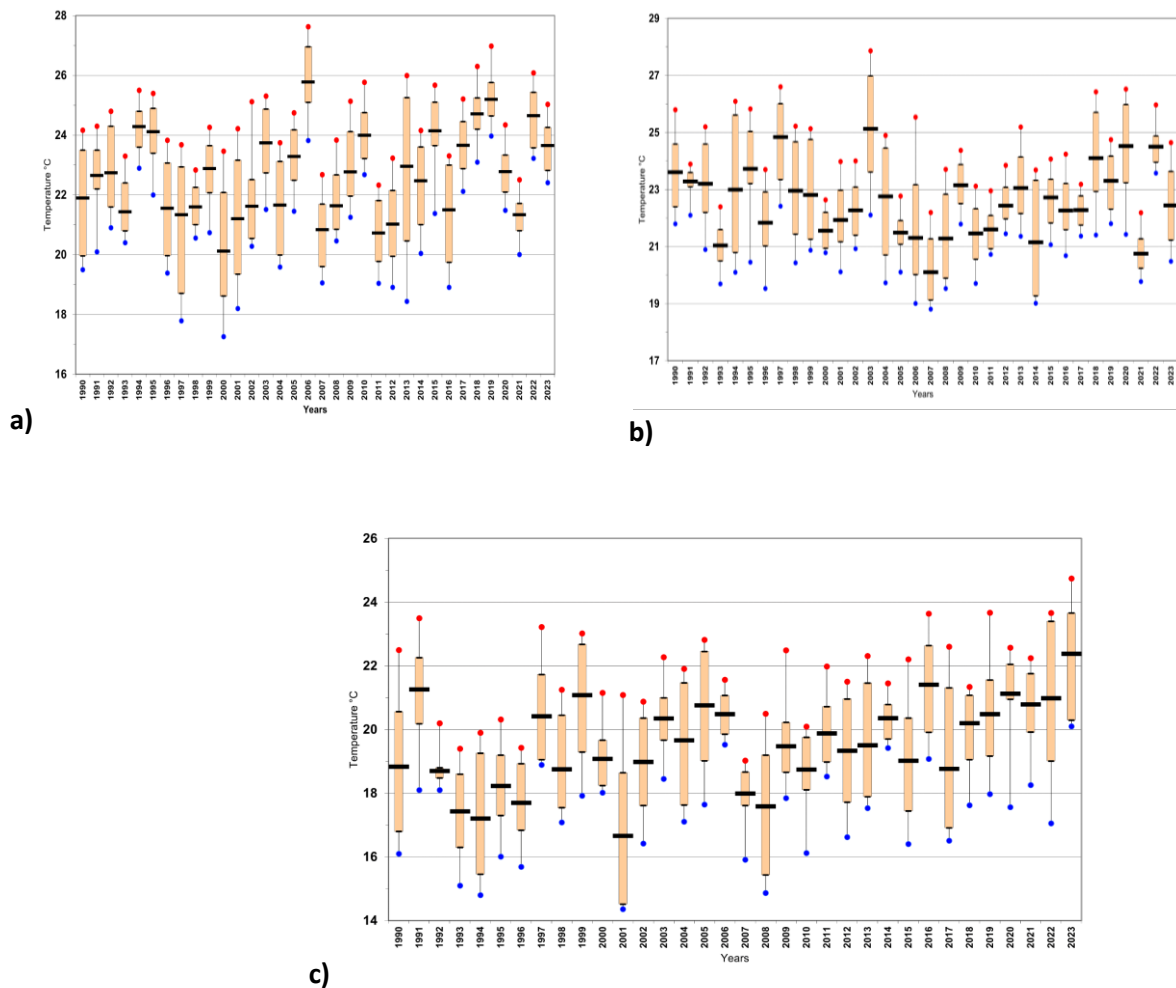


Figure 18 : Variations des températures mensuelles estivales depuis 1990 de la Seine à la station de Bougival- TN : Minimale, TM : Moyenne, TX : Maximale, quantiles 20 % et 80 % ; a) Les températures du mois de juillet, b) Les températures du mois d'août et c) Les températures du mois de septembre.

La Figure 19 illustre les valeurs maximales associées aux températures de l'air et de l'eau sur une période de trois jours consécutifs. La taille des bulles correspond au nombre total de jours par année où la température de l'air a été supérieure à 35 °C au courant de l'été. Les maxima annuels des moyennes

des températures sur 3 jours consécutifs sont associées aux températures de l'air sur les mêmes périodes. La taille des bulles est proportionnelle à la durée de la période chaude ($T_{air\ Moy} > 25^{\circ}C$) avant le maximum. Les années 2003, 2006 et toutes les années depuis 2018 ont connu des conditions hydroclimatiques.

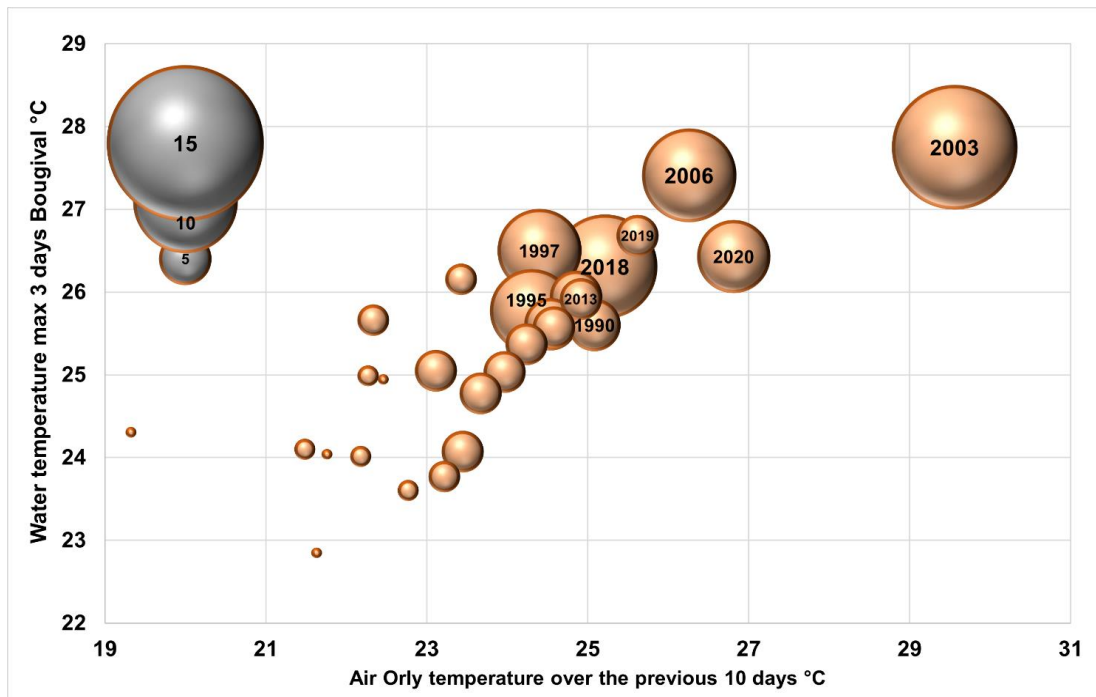


Figure 19 : Température moyenne maximale annuelle sur 3 jours consécutifs et température de l'air à Orly au cours des 10 jours précédents en degrés Celsius - Taille de la bulle : nombre de jours précédant le maximum avec une température de l'air supérieure à 25 °C.

Des températures de l'eau considérablement élevées ont été enregistrées pendant des périodes où la température de l'air dépassait les 35 °C sur une durée maximale de trois jours. Ces extrêmes thermiques pour l'eau ont été particulièrement notables lors des épisodes de canicules, notamment en 2003 et 2006. À titre d'exemple, la température de la Seine a dépassé les 26 °C lors des périodes où les températures de l'air ont maintenu des valeurs supérieures à 35 °C pendant plus de cinq jours consécutifs.

Il est important de noter que les maxima de température pour l'eau ne coïncident pas systématiquement avec ceux de l'air, dépendant de la durée pendant laquelle l'air reste à des températures élevées. En effet, les caractéristiques physiques de l'eau, telles que sa capacité calorifique, impliquent une diffusion de la chaleur plus progressive. Ainsi, plusieurs jours de températures élevées sont nécessaires pour élever la température de l'eau.

L'année 2020 fournit un exemple de cette dynamique : bien que la température maximale de l'air ait été enregistrée le 25 juillet 2020 à 42,6 °C à la station de Paris-Montsouris, cette chaleur intense a été de courte durée. Cela explique le maximum quotidien de la température de l'air à 27 °C, avec une moyenne sur trois jours pour la température de l'eau à 26,7 °C. Ces valeurs demeurent inférieures à celles observées lors des canicules de 2003 et 2006.

3.3 Relation avec la température de l'air, le débit, le rayonnement solaire et la durée d'ensoleillement.

Nombreux sont les facteurs influençant la température de l'eau, des conditions météorologiques (ensoleillement, précipitations...) aux conditions géographiques (rejets thermiques industriels,

ripisylve...). Cependant, tous les paramètres exercent une influence plus ou moins importante selon le rang de Strahler. L'influence des différents facteurs a été analysée sur la station de Bougival grâce à une analyse en composantes principales (ACP).

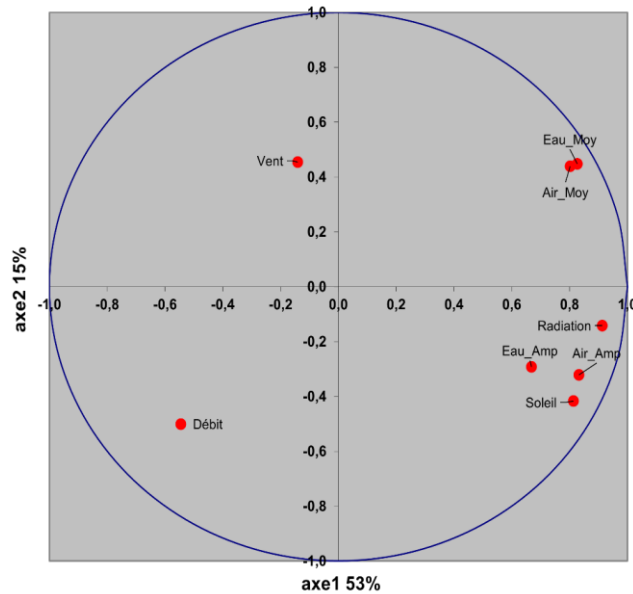


Figure 20 : Analyse en composantes principales (ACP) - La Seine à Bougival (1000 observations de 2019 à 2022) : Eau_Moy : Température moyenne quotidienne de l'eau, Air_Moy : Température moyenne quotidienne de l'air, Eau_Amp : Amplitude quotidienne de la température de l'eau, Air_Amp : Amplitude quotidienne de la température de l'air, Radiation : Radiation quotidienne maximale (W/m²), Soleil : Durée d'ensoleillement quotidienne, Vent : Rafale quotidienne maximale de vent, Débit : Débit de la Seine à Paris-Austerlitz,

L'analyse en composantes principales (ACP) a révélé des conclusions significatives (Figure 20). Une corrélation notable émerge entre les moyennes des températures de l'eau et de l'air. De plus, l'amplitude des variations journalières des températures de l'eau semble être étroitement associée à celles de l'air, ainsi qu'à la radiation solaire maximale journalière et à la durée quotidienne d'ensoleillement. En revanche, des liens moins marqués ont été observés avec le débit de la Seine et la vitesse du vent. À cette position (Paris-Austerlitz), le débit de la Seine connaît en effet une variabilité limitée, étant régulé par les barrages, sauf pendant les périodes de crues.

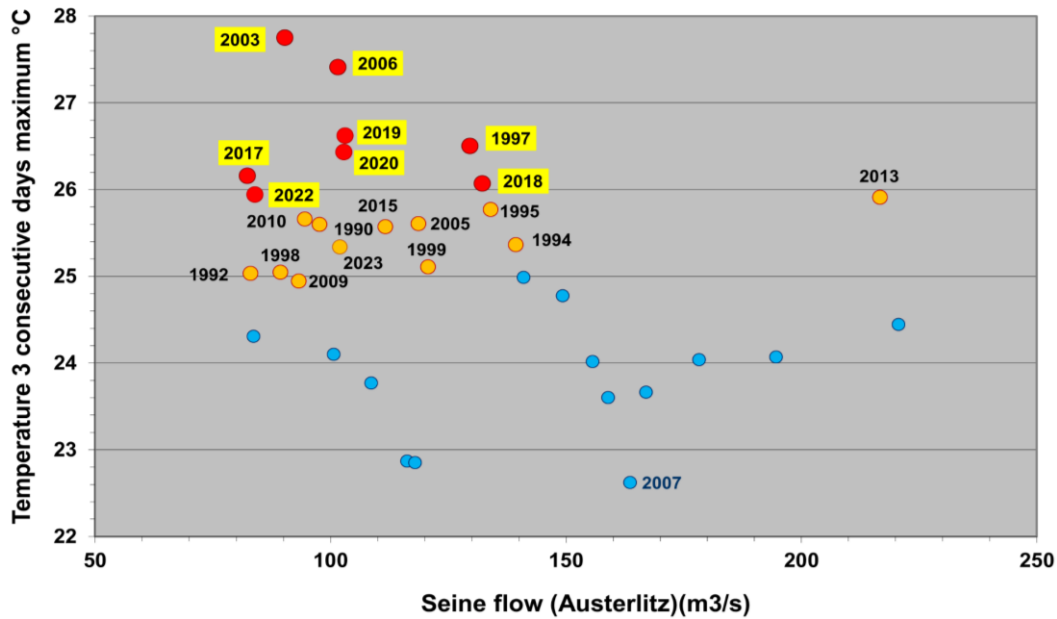


Figure 21 : Températures maximales sur 3 jours consécutifs à Bougival (°C) et débits associés à Austerlitz (m³/s) de 1990 à 2022

La Figure 21 illustre les maxima annuels des moyennes de températures sur des périodes de 3 jours consécutifs ainsi que les débits moyens observés sur ces mêmes intervalles temporels. Les années 2003, 2006, et 1997, ainsi que toutes les années postérieures à 2017, y compris 2022, ont été caractérisées par des conditions hydroclimatiques particulièrement sévères. Néanmoins, l'année 2003 demeure la plus critique parmi ces périodes.

Les données de la période 1990-2021 sont utilisées pour comprendre l'influence de la température de l'air sur la température de la Seine. Ces longues chroniques permettent de prendre en compte des événements extrêmes comme les vagues de chaleur ainsi que les événements hivernaux. Ceci permet une meilleure définition de la relation entre la température de l'air et celle de l'eau. La Figure 22 représente les données de température de l'eau journalière en fonction de celles de l'air pour différentes stations. Cette figure met en évidence l'existence d'un phénomène d'hystérésis entre les périodes de réchauffement et de refroidissement.

Une relation non linéaire a été utilisée afin de décrire au mieux la distribution de la température de l'eau en fonction de celle de l'air. Différents modèles ont été proposés par (Harvey et al., 2011; Mohseni et al., 1998) et (Graf, 2019a) basé sur une fonction logistique, une sigmoïde. L'équation suivante a été utilisée :

$$T_{eau} = \frac{T_w}{1 + a e^{-rT_{air}}}$$

Équation 1

Les paramètres r , a et T_w sont optimisés en fonction des valeurs de T_{eau} et T_{air} pour que la sigmoïde soit au mieux adaptée aux pointes. Le paramètre T_w correspond à la température maximale atteinte par l'eau. Le Tableau 3 regroupe les paramètres obtenus après l'optimisation de l'Équation 1. Les courbes air-eau obtenues sont représentées en rouge sur la Figure 22. Cette relation est linéaire dans la plage de température où la température de l'air se situe entre 0 °C et 25 °C. Au sein de cette plage de température, la variation de la température de l'eau varie linéairement avec celle de l'air.

Cependant, au-delà de ces limites, la relation entre les températures de l'air et de l'eau devient non

linéaire, adoptant une forme sigmoïdale. Le seuil supérieur de cette courbe se situe généralement entre 24 °C et 29 °C pour l'air et entre 28 °C et 31 °C pour l'eau, variant en fonction des stations.

Pour le seuil inférieur de cette courbe, on observe une transition entre 1 °C et 4 °C pour la température de l'air, et entre -5 °C et -10 °C pour celle de l'eau. Ces seuils marquent une transition où la relation entre les températures devient brusque, entraînant des changements significatifs dans la température de l'eau par rapport à celle de l'air. D'autres processus doivent être pris en compte pour être capable de reproduire la température de l'eau. De plus, certaines années, telles que 2003 et 2006, caractérisées par des conditions météorologiques exceptionnellement chaudes, correspondent aux valeurs maximales de la courbe sigmoïdale, représentant la pointe supérieure dans la Figure 23. En revanche, des années comme 2011 et 1990, connues pour être particulièrement froides, correspondent aux valeurs minimales de la courbe sigmoïdale, représentant la pointe inférieure de la Figure 23. Ces années témoignent des extrêmes climatiques qui influencent considérablement la relation entre les températures de l'air et de l'eau de la rivière, positionnant ces valeurs aux extrémités de la courbe sigmoïdale.

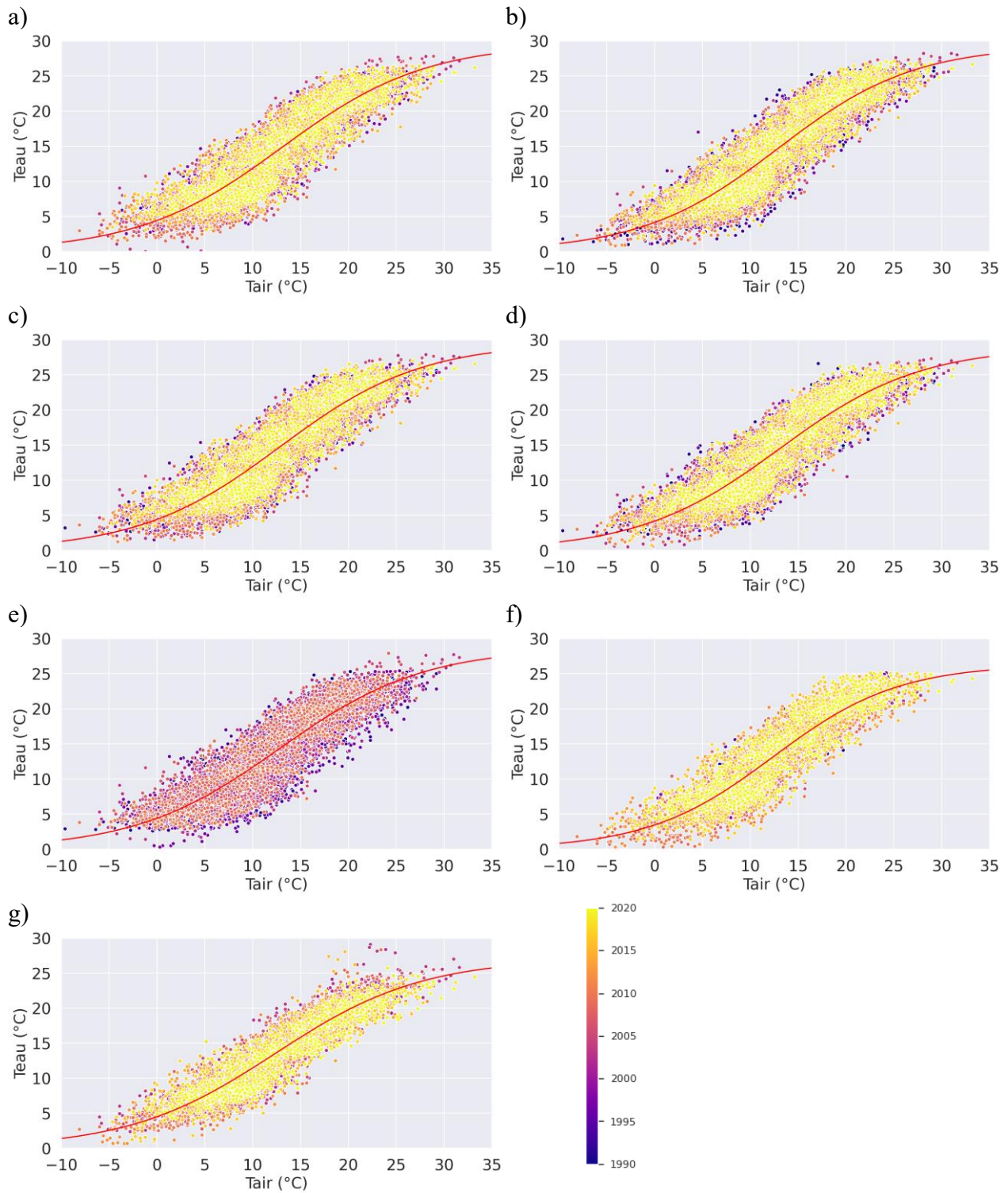


Figure 22 : Relation entre la température de l'air et la température de l'eau entre 1990 et 2020 (chaque année est représentée par des couleurs différentes et la loi sigmoïde est représentée en rouge) : a) Eau de la Seine à Paris, b) Eau de la Seine à Choisy le roi, c) La Seine à Bougival, d) La Marne à Neuilly-sur-Marne, e) La Seine à Oissel, f) L'Oise à Méry-sur-Oise et g) L'Yerres à Villeneuve-Saint-Georges

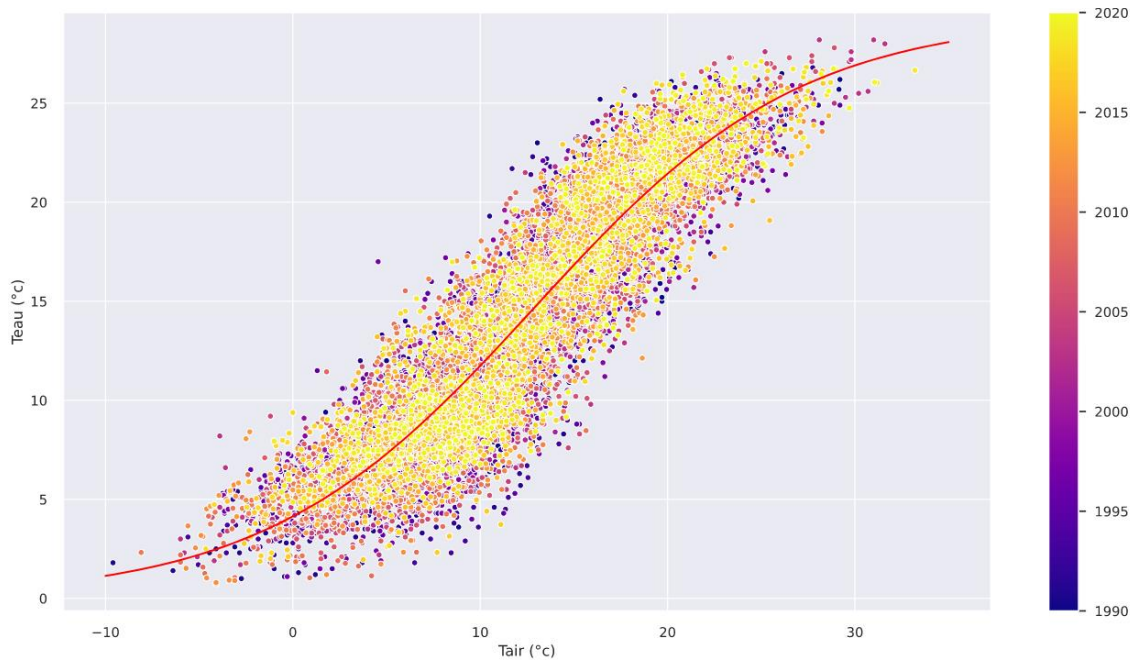


Figure 23 : Liens entre la température de l’air et la température de l’eau pour la station sur la Seine à Choisy-le-Roi, de 1990 à 2020.

Cette relation sigmoïde a été également observée sur d’autres rivières comme pour la rivière Waterford au Canada (Harvey et al., 2011), la rivière Notec-Pakoscn en Pologne (Graf, 2019b ; Graf et al., 2019), ainsi que pour la rivière Cuyahoga aux Etats-Unis (Mohseni et al., 1998). La relation air-eau de la rivière Cuyahoga, étant étudiée sur deux ans, ne fait pas ressortir les deux paliers, d’où l’importance d’une longue période d’étude. Les paliers inférieurs des rivières polonaises étudiées sur la période 1987-2013, sont parfaitement défini, contrairement au palier supérieur. Ceci s’explique notamment par la zone géographique et le climat qui influence la relation air-eau. La position de la rivière dans le bassin a également un impact sur la relation air-eau. Les relations air-eau pour la Seine ont des maximums de température plus élevée que les cours d’eau d’ordre de Strahler moins élevé. Ceci s’explique par plusieurs facteurs : i) la surface de contact entre l’air et l’eau plus importante pour les ordres de Strahler élevés, la ripisylve moins importante sur les grands cours d’eau que sur les petits cours d’eau et un ombrage moins conséquent. Dans le cas de l’agglomération parisienne, nous pouvons également ajouter la végétation moins importante, les débits régulés par les barrages ainsi que l’impact de l’îlot de chaleur urbain.

Tableau 3 : Récapitulatif des paramètres de la fonction de régression non linéaire pour les différentes stations

Station	Ordre de Strahler	T _w	a	r
La Seine à Choisy-le-Roi	6	29,6	5,71	0,14
La Seine à Paris	7	29,6	5,70	0,13
La Seine à Bougival	7	29,6	5,71	0,13
La Seine à Oissel	7	28,7	5,49	0,13
La Marne à Neuilly-sur-Marne	6	29	5,94	0,14
L’Oise à Méry-sur-Oise	6	26,3	6,62	0,15
L’Yerres à Villeneuve Saint-Georges	4	27,0	5,02	0,13

4 Conclusion

Cette première étude rassemble les observations météorologiques depuis la fin du XIXe siècle jusqu’à nos jours, offrant ainsi une comparaison entre les mesures historiques et contemporaines. Elle caractérise

les principaux changements dans les tendances et les extrêmes des températures à l'échelle du bassin de la Seine, reflétant l'influence significative de l'îlot de chaleur urbain de Paris. L'analyse approfondie a été menée à la fois annuellement et selon les saisons. Ces investigations soulignent l'importance cruciale des observations directes et mettent en lumière la nécessité de centraliser les données de température des cours d'eau à des intervalles temporels horaires, et ce sur des périodes continues de plus de 30 ans.

Les moyennes annuelles de 1870 à 2019 des stations historiques indiquent une hausse de 2,5 °C de la température de l'air à Montsouris, et une hausse de celle de l'eau de la Seine à Paris et de la Marne qui a progressé de 1,6 °C par siècle depuis les années 1870.

De plus, l'étude des données historiques met en évidence une évolution significative : la plage des températures extrêmes s'étend désormais de juin à septembre, contrastant avec la période antérieure concentrée principalement sur juillet-août. Les températures maximales présentent une tendance à l'augmentation aussi bien à l'échelle annuelle que saisonnière. Les vagues de chaleur ont augmenté en fréquence de 1984 à 2022, avec les augmentations les plus marquées se produisant au printemps et en été. Nous ne pouvons pas déterminer la date de modification de cette fréquence par manque de données entre 1938 et 1984.

Les mesures de la température de l'eau de la Seine sur la période 1990-2020 ont permis de mettre en avant l'impact des températures de l'air sur le réchauffement de l'eau. De fortes températures pour l'eau ont jusqu'à présent été observées durant des périodes où la température de l'air dépassait les 35 °C en maximums sous trois jours. Les maximas atteints pour la température de l'air ne surviennent pas toujours au même moment qu'à ceux pour la température de l'eau. En effet, les propriétés physiques de l'eau, dont sa capacité calorifique, font que l'eau n'emmagasine pas des calories instantanément. Il est nécessaire que la température de l'air reste élevée plusieurs jours pour augmenter la température de l'eau.

Par ailleurs, une distinction nette émerge entre les stations situées à l'intérieur de Paris et celles en dehors des zones urbaines. Les stations dans Paris indiquent des températures plus élevées, tandis que la durée des extrêmes de température semble également plus proéminente à proximité et au sein même de Paris que pour les stations situées en amont et en aval de l'agglomération, et sur les affluents de la Seine. Les températures des stations dans Paris sont très semblables avec une légère augmentation à la sortie de Paris.

La température des rivières est principalement liée à la température de l'air. Son évolution dépend de la durée et des valeurs des événements froids ou chauds de la température de l'air. Les autres facteurs diminuent la relation entre l'air et l'eau pendant les périodes extrêmes. Ceci a déjà été prouvé dans la littérature. Les débits de la Seine ont peu d'impact sur la température de la Seine dans Paris, car ces débits sont contrôlés par les barrages. Ceci devient toutefois caduc pendant les périodes de très forts débits.

Cette étude anticipe également une perspective prometteuse : celle de comprendre de manière approfondie ces changements actuels en exploitant l'intégralité des observations de température des cours d'eau et des nappes phréatiques du bassin de la Seine. Dans ce contexte, nous lançons un appel à toutes les parties détenant des données pertinentes, les encourageant vivement à nous les transmettre. Cette collaboration permettra de compléter notre base de données et d'affiner notre compréhension des tendances en fonction de la localisation des stations, des paramètres météorologiques, du fonctionnement hydrodynamique et des influences anthropiques

Remerciements

Les auteurs remercient les partenaires producteurs de données : SIAAP, SEDIF, SUEZ, BNF, Météo-France, SyAGE, GIP-Seine aval, OFB, Ville de Paris, Fraîcheur de Paris, Eau de Paris, Hydrowatt, Groupe Energie, EDF, PIREN-Seine, Agence de l'eau Seine-Normandie, Haropa, Les auteurs invitent tous les autres producteurs de données à les contacter pour continuer d'enrichir cette base de

données.

Pour retrouver les outils et données

Les données du bassin de la Seine ne sont pas encore publiées.

Bibliographie

- Adamowski, J., Chan, H.F., 2011. A wavelet neural network conjunction model for groundwater level forecasting. *J. Hydrol.* 407, 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.013>
- Allen, and Barros, Vicente Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., Dubash, N., Edenhofer, O., Elgizouli, I., Field, C., Forster, P., Friedlingstein, Pierre Fuglestvedt, J., Gomez-Echeverri, L., Hallegatte, S., Hegerl, G., Urge-Vorsatz, D., 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report.*
- Arago, 1858. Des hivers qui ont amené la congélation des grands fleuves., *Not. Sci. Tome 8 Vol. 5 ParisLeipzig* 244–256.
- Arora, R., Tockner, K., Venohr, M., 2016. Changing river temperatures in northern Germany: trends and drivers of change. *Hydrol. Process.* 30, 3084–3096. <https://doi.org/10.1002/hyp.10849>
- Bates, B.C., Kundzewics, Z.W., Wu, S., J Palutikof, P., 2008. Le changement climatique et l’eau, document technique publié par le Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat. *Rapp. GIEC Éd 2008* 236.
- Beaufort, A., 2015. *Modélisation physique de la température des cours d’eau à l’échelle régionale: application au bassin versant de la Loire (PhD Thesis).* Université François Rabelais de Tours.
- Beaufort, A., Moatar, F., Curie, F., Ducharne, A., Bustillo, V., Thiéry, D., 2016. River Temperature Modelling by Strahler Order at the Regional Scale in the Loire River Basin, France. *River Res. Appl.* 32, 597–609. <https://doi.org/10.1002/rra.2888>
- Beaufort, A., Moatar, F., Sauquet, E., Magand, C., 2020. *Thermie en rivière : Analyse géostatistique et description de régime : Application à l’échelle de la France (Research Report).* INRAE.
- Benz, S.A., Bayer, P., Blum, P., 2017. Global patterns of shallow groundwater temperatures. *Environ. Res. Lett.* 12, 034005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5fb0>
- Berounsky, V., Nixon, S.W., 1990. Temperature and the annual cycle of nitrification in waters of Narragansett Bay. *Limnol Ocean.* 35, 1610–1617.
- Bonte, M., Stuyfzand, P.J., Breukelen, B.M.V., 2014. Reactive Transport Modeling of Thermal Column Experiments to Investigate the Impacts of Aquifer Thermal Energy Storage on Groundwater Quality. *Environ. Sci. Technol.* 48, 12099–12107. <https://doi.org/10.1021/es502477m>
- Bonte, M., Van Breukelen, B.M., Stuyfzand, P.J., 2013. Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production. *Water Res.* 47, 5088–5100.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.049>

- Borman, M.M., Larson, L.L., 2003. A case study of river temperature response to agricultural land use and environmental thermal patterns. *J. Soil Water Conserv.* 58, 8–12.
- Bouletreau, S., Salvo, E., Lyautey, E., Mastrorillo, S., 2012. Temperature dependence of denitrification in phototrophic river biofilms. *Sci. Total Environ.* 416, 323–328. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.066>
- Bouletreau, S., Salvo, E., Lyautey, E., Mastrorillo, S., 2012. Temperature dependence of denitrification in phototrophic river biofilms. *Sci. Total Environ.* 416, 323–328. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.066>
- Briemann, H., Griebler, C., Schmidt, S.I., Michel, R., Lueders, T., 2009. Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems: Ecosystem impacts of groundwater heat discharge. *FEMS Microbiol. Ecol.* 68, 273–286. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2009.00674.x>
- Buitinck, L., Louppe, G., Blondel, M., Pedregosa, F., Mueller, A., Grisel, O., Niculae, V., Prettenhofer, P., Gramfort, A., Grobler, J., Layton, R., VanderPlas, J., Joly, A., Holt, B., Varoquaux, G., 2013. {API} design for machine learning software: experiences from the scikit-learn project, in: *ECML PKDD Workshop: Languages for Data Mining and Machine Learning*. pp. 108–122.
- Caissie, D., 2006a. The thermal regime of rivers: a review. *Freshw. Biol.* 51, 1389–1406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>
- Caissie, D., 2006b. The thermal regime of rivers: a review. *Freshw. Biol.* 51, 1389--1406. <https://doi.org/0.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>
- Calmets, P., Corompt, P., 1972. Détermination de la distribution des temps de séjour de la {S}eine entre le pont de Poissy et le barrage de Méricourt (Essais de mai à octobre 1972). *Etude dans le cadre de la pollution thermique*.
- Cavendish, C., 1757. A description of some thermometers for particular uses. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 50, 300-310.
- Comer-Warner, S.A., Romeijn, P., Gooddy, D.C., Ullah, S., Kettridge, N., Marchant, B., Hannah, D.M., Krause, S., 2018. Thermal sensitivity of CO₂ and CH₄ emissions varies with streambed sediment properties. *Nat. Commun.* 9. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04756-x>
- Crampon, C., 2020. EN DIRECT 18.08.2020, Canicule 2020, quel impact sur les centrales nucléaires françaises et les autres énergies ? *Rev. Générale Nucl. SFEN L'INFORMATION Réf. SUR L'ÉNERGIE Nucl.* <https://climate.copernicus.eu/index.php/latest-projections-future-climate-now-available>
- Daher, B.T., Mohtar, R.H., 2015. Water–energy–food (WEF) Nexus Tool 2.0: guiding integrative resource planning and decision-making. *Water Int.* 40, 748–771. <https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1074148>
- Dallas, Helen F, Rivers-Moore, N.A., 2012. Critical Thermal Maxima of aquatic macroinvertebrates: towards identifying bioindicators of thermal alteration. *Hydrobiologia* 679, 61–76. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0856-4>
- Dallas, H. F., Rivers-Moore, N.A., 2012. Critical Thermal Maxima of aquatic macroinvertebrates: towards identifying bioindicators of thermal alteration. *Hydrobiologia* 679, 61–76. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0856-4>
- Dallas, H.F., Ross-Gillespie, V., 2015. Sublethal effects of temperature on freshwater organisms, with

- special reference to aquatic insects. *Water SA* 41, 712–726.
- Delpla, I., Jung, A.-V., Baures, E., Clement, M., Thomas, O., 2009. Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environ. Int.* 35, 1225–1233.
- Dousset, B., Gourmelon, F., Mauri, E., 2007. Application of satellite Remote Sensing for Urban Risk Analysis: a case study of the 2003 extreme heat wave in Paris, in: 2007 Urban Remote Sensing Joint Event. Presented at the 2007 Urban Remote Sensing Joint Event, IEEE, Paris, France, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/URS.2007.371849>
- DREAL Pays de la Loire, 2016. Température des cours d'eau sur le périmètre de la cellule de qualité des eaux. Collection Analyses et connaissance.
- DRIAS, 2020. LES NOUVELLES PROJECTIONS CLIMATIQUES DE RÉFÉRENCE DRIAS 2020 POUR LA MÉTROPOLE.
- Drysdale, R., Lucas, S., Carthew, K., 2003. The influence of diurnal temperatures on the hydrochemistry of a tufa-depositing stream. *Hydrol. Process.* 17, 3421–3441. <https://doi.org/10.1002/hyp.1301>
- Ducharne, A., 2008. Importance of stream temperature to climate change impact on water quality. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12, 797–810. <https://doi.org/10.5194/hess-12-797-2008>
- Dugdale, S.J., Hannah, D.M., Malcolm, I.A., 2017. River temperature modelling: A review of process-based approaches and future directions. *Earth-Sci. Rev.* 175, 97–113. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.10.009>
- Dugdale, Stephen J., Hannah, D.M., Malcolm, I.A., 2017. River temperature modelling: A review of process-based approaches and future directions. *Earth-Sci. Rev.* 175, 97–113. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.10.009>
- Feigl, M., Lebieczinski, K., Herrnegger, M., Schulz, K., 2021. Machine-learning methods for stream water temperature prediction. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25, 2951–2977. <https://doi.org/10.5194/hess-25-2951-2021>
- Ficklin, D.L., Stewart, I.T., Maurer, E.P., 2013. Effects of climate change on stream temperature, dissolved oxygen, and sediment concentration in the Sierra Nevada in California. *Water Resour. Res.* 49, 2765–2782. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20248>
- Fullerton, A.H., Torgersen, C.E., Lawler, J.J., Steel, E.A., Ebersole, J.L., Lee, S.Y., 2017. Longitudinal thermal heterogeneity in rivers and refugia for coldwater species: effects of scale and climate change. *Aquat. Sci.* 80, 3. <https://doi.org/10.1007/s00027-017-0557-9>
- Graf, R., 2019a. A multifaceted analysis of the relationship between daily temperature of river water and air. *Acta Geophys.* 67, 905–920. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00285-3>
- Graf, R., 2019b. A multifaceted analysis of the relationship between daily temperature of river water and air. *Acta Geophys.* 67, 905–920. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00285-3>
- Graf, R., Zhu, S., Sivakumar, B., 2019. Forecasting river water temperature time series using a wavelet–neural network hybrid modelling approach. *J. Hydrol.* 578, 124115. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124115>
- Gu, R.R., Li, Y., 2002. River temperature sensitivity to hydraulic and meteorological parameters. *J. Environ. Manage.* 66, 43–56. <https://doi.org/10.1006/jema.2002.0565>
- Halliday, S.J., Wade, A.J., Skeffington, R.A., Neal, C., Reynolds, B., Rowland, P., Neal, M., Norris, D., 2012. An analysis of long-term trends, seasonality and short-term dynamics in water quality data from Plynlimon, Wales. *Sci. Total Environ.* 434, 186–200.

- Hanasaki, N., Yoshikawa, S., Pokhrel, Y., Kanae, S., 2018. A global hydrological simulation to specify the sources of water used by humans. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 789–817. <https://doi.org/10.5194/hess-22-789-2018>
- Hannah, D.M., Garner, G., 2015. River water temperature in the United Kingdom: changes over the 20th century and possible changes over the 21st century. *Prog. Phys. Geogr.* 39, 68–92. <https://doi.org/10.1177/0309133314550669>
- Hartmann, P., Bordet, F., Chevalier, C., Colin, J., Michel, K., 2013. Centrales nucléaires et environnement, Prélèvements d'eau et rejets. Guide Inf.
- Harvey, R., Lye, L., Khan, A., Paterson, R., 2011. The Influence of Air Temperature on Water Temperature and the Concentration of Dissolved Oxygen in Newfoundland Rivers. *Can. Water Resour. J.* 36, 171–192. <https://doi.org/10.4296/cwrj3602849>
- Hester, E.T., Doyle, M.W., 2011. Human Impacts to River Temperature and Their Effects on Biological Processes: A Quantitative Synthesis. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 47, 571–587. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00525.x>
- Hester, E.T., Doyle, M.W., Poole, G.C., 2009. The influence of in-stream structures on summer water temperatures via induced hyporheic exchange. *Limnol. Oceanogr.* 54, 355–367. <https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.1.0355>
- Hobday, A., Oliver, E., Sen Gupta, A., Benthuyssen, J., Burrows, M., Donat, M., Holbrook, N., Moore, P., Thomsen, M., Wernberg, T., Smale, D., 2018. Categorizing and Naming Marine Heatwaves. *Oceanography* 31. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.205>
- Hobday, A.J., Alexander, L.V., Perkins, S.E., Smale, D.A., Straub, S.C., Oliver, E.C.J., Benthuyssen, J.A., Burrows, M.T., Donat, M.G., Feng, M., Holbrook, N.J., Moore, P.J., Scannell, H.A., Sen Gupta, A., Wernberg, T., 2016. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Prog. Oceanogr.* 141, 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>
- Humphreys, A., ABBOT, H., 1861. Report upon the physics and hydraulics of the Mississippi River.
- Ibrahim, M., Jemei, S., Wimmer, G., Steiner, N.Y., Kokonendji, C.C., Hissel, D., 2015. Selection of mother wavelet and decomposition level for energy management in electrical vehicles including a fuel cell. *Int. J. Hydrog. Energy* 40, 15823–15833. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.055>
- IPCC, 2018. Global Warming of 1.5° C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5° C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Isaak, D.J., Luce, C.H., Rieman, B.E., Nagel, D.E., Peterson, E.E., Horan, D.L., Parkes, S., Chandler, G.L., 2010. Effects of climate change and wildfire on stream temperatures and salmonid thermal habitat in a mountain river network. *Ecol. Appl.* 1350–1371. <https://doi.org/10.1890/09-0822.1>
- Isaak, D. J., Wollrab, S., Horan, D., Chandler, G., 2012. Climate change effects on stream and river temperatures across the northwest U.S. from 1980–2009 and implications for salmonid fishes. *Clim. Change* 113, 499–524. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0326-z>
- Isaak, D J, Wollrab, S., Horan, D., Chandler, G., 2012. Climate change effects on stream and river temperatures across the northwest U.S. from 1980–2009 and implications for salmonid fishes. *Clim. Change* 113, 499–524. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0326-z>
- Jackson, F.L., Fryer, R.J., Hannah, D.M., Millar, C.P., Malcolm, I.A., 2018. A spatio-temporal statistical model of maximum daily river temperatures to inform the management of Scotland's Atlantic salmon

- rivers under climate change. *Sci. Total Environ.* 612, 1543–1558. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.010>
- Jensen, M.J., 2000. An alternative maximum likelihood estimator of long memory processes using compactly supported wavelets. *J Econ Dyn Control* 24, 361–387.
- Jentsch, A., Kreyling, J., Beierkuhnlein, C., 2007. A New Generation of Climate-Change Experiments: Events, Not Trends. *Front. Ecol. Environ.* 5, 365–374.
- Johnson, S.L., Jones, J.A., 2000. Stream temperature responses to forest harvest and debris flows in western Cascades, Oregon. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 57, 30–39. <https://doi.org/10.1139/f00-109>
- Jonsson, B., Jonsson, N., 2017. Fecundity and water flow influence the dynamics of Atlantic salmon. *Ecol. Freshw. Fish* 26, 497–502. <https://doi.org/10.1111/eff.12294>
- Kaushal, S.S., Likens, G.E., Jaworski, N.A., Pace, M.L., Sides, A.M., Seekell, D., Belt, K.T., Secor, D.H., Wingate, R.L., 2010. Rising stream and river temperatures in the United States. *Front. Ecol. Environ.* 8, 461–466. <https://doi.org/10.1890/090037>
- Kiliç, D., 2022. Modélisation des flux d'eau et d'énergie dans le bassin de la Seine (PhD Thesis). PSL University.
- Kolb, C., Pozzi, M., Samaras, C., VanBriesen, J.M., 2017. Climate Change Impacts on Bromide, Trihalomethane Formation, and Health Risks at Coastal Groundwater Utilities. *ASCE-ASME J. Risk Uncertain. Eng. Syst. Part Civ. Eng.* 3, 04017006. <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0000904>
- Le Comte MoroZZo, M., 1788. Sur la Temperature dr L'Eau. *Memoires de l'Academie Royale des Sciences* (Turin).
- Lepori, F., Pozzoni, M., Pera, S., 2015. What Drives Warming Trends in Streams? A Case Study from the Alpine Foothills. *River Res. Appl.* 31, 663–675. <https://doi.org/10.1002/rra.2763>
- Liu, B., Yang, D., Ye, B., Berezovskaya, S., 2005. Long-term open-water season stream temperature variations and changes over Lena River Basin in Siberia. *Glob. Planet. Change* 48, 96–111. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.12.007>
- Maheu, A., St-Hilaire, A., Caissie, D., El-Jabi, N., 2016. Understanding the Thermal Regime of Rivers Influenced by Small and Medium Size Dams in Eastern Canada. *River Res. Appl.* 32, 2032–2044. <https://doi.org/10.1002/rra.3046>
- Maki, J.S., Mitchell, R., 1989. L'adhésion microbienne aux surfaces et ses conséquences, in: *Micro-Organismes Dans Les Écosystèmes Océaniques*. Masson, pp. 387–409.
- Marmonier, P., Archambaud, G., Belaidi, N., Bougon, N., Breil, P., Chauvet, E., Claret, C., Cornut, J., Datry, T., Dole-Olivier, M.J., Dumont, B., Flipo, N., Foulquier, A., Gérino, M., Guilpart, A., Julien, F., C.Maazouzi, Martin, D., Mermillod-Blondin, F., Montuelle, B., Namour, Ph., Navel, S., Ombredane, D., Pelte, T., Piscart, C., Pusch, M., Stroffek, S., Robertson, A., Sanchez-Pérez, J.M., Sauvage, S., Taleb, A., Wantzen, M., Vervier, Ph., 2012. The role of organisms in hyporheic processes : gaps in current knowledge, needs for future research and applications. *Ann Limnol - Int J Lim* 48, 253–266.
- Marzadri, A., Tonina, D., Bellin, A., 2013. Effects of stream morphodynamics on hyporheic zone thermal regime. *Water Resour. Res.* 49, 2287–2302. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20199>
- Matthews, K.R., Berg, N.H., 1997. Rainbow trout responses to water temperature and dissolved oxygen stress in two southern California stream pools. *J. Fish Biol.* 50, 50–67. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1997.tb01339.x>

- Michel, A., Brauchli, T., Lehning, M., Schaefli, B., Huwald, H., 2020. Stream temperature and discharge evolution in Switzerland over the last 50 years: annual and seasonal behaviour. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 24, 115–142. <https://doi.org/10.5194/hess-24-115-2020>
- Moatar, F., Gailhard, J., 2006. Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1881. *C R Geosci.* 338, 319–328. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.02.011>
- Mohseni, O., Stefan, H.G., 1999a. Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation. *J. Hydrol.* 218, 128–141. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00034-7)
- Mohseni, O., Stefan, H.G., Erickson, T.R., 1998. A nonlinear regression model for weekly stream temperatures. *Water Resour. Res.* 34, 2685–2692. <https://doi.org/10.1029/98WR01877>
- Mohseni, O., Stefan, H.G.G., 1999b. Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation. *J. Hydrol.* 218, 128–141. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00034-7)
- Montalvo, C., García-Berrocal, A., 2015. Improving the in situ measurement of RTD response times through Discrete Wavelet Transform in NPP. *Ann. Nucl. Energy* 80, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.02.004>
- Moore, R.D., Sutherland, P., Gomi, T., Dhakal, A., 2005. Thermal regime of a headwater stream within a clear-cut, coastal British Columbia, Canada. *Hydrol. Process.* 19, 2591–2608. <https://doi.org/10.1002/hyp.5733>
- Nourani, V., Alami, M.T., Aminfar, M.H., 2009. A combined neural-wavelet model for prediction of Ligvanchai watershed precipitation. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 22, 466–472. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2008.09.003>
- Nourani, V., Kisi, Ö., Komasi, M., 2011. Two hybrid Artificial Intelligence approaches for modeling rainfall–runoff process. *J. Hydrol.* 402, 41–59. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.002>
- Nourani, V., Parhizkar, M., 2013. Conjunction of SOM-based feature extraction method and hybrid wavelet-ANN approach for rainfall–runoff modeling. *J. Hydroinformatics* 15, 829–848. <https://doi.org/10.2166/hydro.2013.141>
- Olden, J.D., Naiman, R.J., 2010. Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshw. Biol.* 55. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02179.x>
- Ouellet, V., St-Hilaire, A., Dugdale, S.J., Hannah, D.M., Krause, S., Proulx-Ouellet, S., 2020. River temperature research and practice: Recent challenges and emerging opportunities for managing thermal habitat conditions in stream ecosystems. *Sci. Total Environ.* 736, 139679. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139679>
- Ouellet, Valerie, St-Hilaire, A., Dugdale, S.J., Hannah, D.M., Krause, S., Proulx-Ouellet, S., 2020. River temperature research and practice: Recent challenges and emerging opportunities for managing thermal habitat conditions in stream ecosystems. *Sci. Total Environ.* 736, 139679. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139679>
- Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., Vautard, R., 2014. Drias, données Météo-France. CERFACS IPSL.
- Pan, W., Huang, Q., Huang, G., Xing, L., 2021. Modeling the effects of temperature on the migration and transformation of nitrate during riverbank filtration using HYDRUS-2D. *Sci. Total Environ.* 783, 146656. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146656>
- Payne, N.L., Smith, J.A., van der Meulen, D.E., Taylor, M.D., Watanabe, Y.Y., Takahashi, A., Marzullo,

- T.A., Gray, C.A., Cadiou, G., Suthers, I.M., 2016. Temperature dependence of fish performance in the wild: links with species biogeography and physiological thermal tolerance. *Funct. Ecol.* 30, 903–912. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12618>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., Duchesnay, E., 2011. Scikit-learn: Machine Learning in {P}ython. *J. Mach. Learn. Res.* 12, 2825–2830.
- Piccolroaz, S., Calamita, E., Majone, B., Gallice, A., Siviglia, A., Toffolon, M., 2016. Prediction of river water temperature: a comparison between a new family of hybrid models and statistical approaches. *Hydrol. Process.* 30, 3901–3917. <https://doi.org/10.1002/hyp.10913>
- Poole, G.C., Berman, C.H., 2001. An Ecological Perspective on In-Stream Temperature: Natural Heat Dynamics and Mechanisms of Human-Caused Thermal Degradation. *Environ. Manage.* 27, 787–802. <https://doi.org/10.1007/s002670010188>
- Potočník, J., 2007. Renewable Energy Sources and the Realities of Setting an Energy Agenda. *Science* 315, 810–811. <https://doi.org/10.1126/science.1139086>
- Rajwa-Kuligiewicz, A., Bialik, R.J., Rowiński, P.M., 2015. Dissolved oxygen and water temperature dynamics in lowland rivers over various timescales. *J. Hydrol. Hydromech.* 63, 353–363. <https://doi.org/10.1515/johh-2015-0041>
- Råman Vinnå, L., Wüest, A., Bouffard, D., 2017. Physical effects of thermal pollution in lakes. *Water Resour. Res.* 53, 3968–3987. <https://doi.org/10.1002/2016WR019686>
- Saito, T., Hamamoto, S., Ueki, T., Ohkubo, S., Moldrup, P., Kawamoto, K., Komatsu, T., 2016. Temperature change affected groundwater quality in a confined marine aquifer during long-term heating and cooling. *Water Res.* 94, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.043>
- Sallam, G.A.H., Elsayed, E.A., 2015. Estimating the impact of air temperature and relative humidity change on the water quality of Lake Manzala, Egypt. *J. Nat. Resour. Dev.* <https://doi.org/10.5027/jnrd.v5i0.11>
- Salmaso, F., Quadroni, S., Gentili, G., Crosa, G., 2017. Thermal regime of a highly regulated Italian River (Ticino River) and implications for aquatic communities. *J. Limnol.* 76, 23–33. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2016.1437>
- Sang, Y.-F., 2012. A Practical Guide to Discrete Wavelet Decomposition of Hydrologic Time Series. *Water Resour. Manag.* 26, 3345–3365. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0075-4>
- Shukla, P.R., Skea, J., Buendia, E.C., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., Diemen, R. van, Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Pereira, J.P., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Malley, M.J., 2019. IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.
- Sinokrot, B.A., Stefan, H.G., McCormick, J.H., Eaton, J.G., 1995. Modeling of climate change effects on stream temperatures and fish habitats below dams and near groundwater inputs. *Clim. Change* 30, 181–200. <https://doi.org/10.1007/BF01091841>
- Souaissi, Z., Ouarda, T.B.M.J., St-Hilaire, A., Ouali, D., 2023. Regional frequency analysis of stream temperature at ungauged sites using non-linear canonical correlation analysis and generalized additive models. *Environ. Model. Softw.* 163, 105682. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105682>

- Stanford, J.A., Boulton, A.J., 1993. Hydrology and the distribution of hyporheos: perspectives from a mesic river and a desert stream. *J. North Am. Benthol. Soc.* 12, 79–83.
- Stumm, W., Morgan, J.J., 1981. *Aquatic Chemistry. An introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters.* John Wiley and sons.
- Sutadian, A.D., Mutil, N., Yilmaz, A.G., Perera, B.J.C., 2015. Development of river water quality indices—a review. *Environ. Monit. Assess.* 188, 58. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0>
- Tang, S., Qiao, S., Wang, B., Liu, F., Feng, T., Yang, J., He, M., Chen, D., Cheng, J., Feng, G., Dong, W., 2023. Linkages of unprecedented 2022 Yangtze River Valley heatwaves to Pakistan flood and triple-dip La Niña. *Npj Clim. Atmospheric Sci.* 6, 44. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00386-3>
- Tassone, S.J., Besterman, A.F., Buelo, C.D., Ha, D.T., Walter, J.A., Pace, M.L., 2023. Increasing heatwave frequency in streams and rivers of the United States. *Limnol. Oceanogr. Lett.* 8, 295–304. <https://doi.org/10.1002/lol2.10284>
- Tavares, M.H., Cunha, A.H.F., Motta-Marques, D., Ruhoff, A.L., Fragoso, C.R., Munar, A.M., Bonnet, M.-P., 2020. Derivation of consistent, continuous daily river temperature data series by combining remote sensing and water temperature models. *Remote Sens. Environ.* 241, 111721. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111721>
- Tissot, L., Souchon, Y., 2010. Synthèse des tolérances thermiques des principales espèces de poissons des rivières et fleuves de plaine de l'ouest européen 17. <https://doi.org/10.1051/hydro/2010004>
- Van Vliet, M.T.H., Franssen, W.H.P., Yearsley, J.R., Ludwig, F., Haddeland, I., Lettenmaier, D.P., Kabat, P., 2013. Global river discharge and water temperature under climate change. *Glob. Environ. Change* 23, 450–464. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.11.002>
- Vega, M., Pardo, R., Barrado, E., Debán, L., 1998. Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis. *Water Res.* 32, 3581–3592. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00138-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00138-9)
- W. Schlegel, R., J. Smit, A., 2018. heatwaveR: A central algorithm for the detection of heatwaves and cold-spells. *J. Open Source Softw.* 3, 821. <https://doi.org/10.21105/joss.00821>
- Wang, D., Tse, P.W., Tsui, K.L., 2013. An enhanced Kurtogram method for fault diagnosis of rolling element bearings. *Mech. Syst. Signal Process.* 35, 176–199. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.10.003>
- Wang, S., Flipo, N., Romary, T., 2019. Oxygen data assimilation for estimating micro-organism communities' parameters in river systems. *Water Res.* 165, 115021. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115021>
- Webb, B.W., 1996. Trends in stream and river temperature. *Hydrol. Process.* 10, 205–226. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199602\)10:2<205::AID-HYP358>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199602)10:2<205::AID-HYP358>3.0.CO;2-1)
- Webb, B.W., Hannah, D.M., Moore, R.D., Brown, L.E., Nobilis, F., 2008. Recent advances in stream and river temperature research. *Hydrol. Process.* 22, 902–918. <https://doi.org/10.1002/hyp.6994>
- Webb, Bruce W., Hannah, D.M., Moore, R.D., Brown, L.E., Nobilis, F., 2008. Recent advances in stream and river temperature research. *Hydrol. Process.* 22, 902–918. <https://doi.org/10.1002/hyp.6994>
- Webb, B. W., Nobilis, F., 2007. Long-term changes in river temperature and the influence of climatic and hydrological factors. *Hydrol. Sci. J.* 52, 74–85. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.1.74>
- Webb, Bruce W., Nobilis, F., 2007. Long-term changes in river temperature and the influence of climatic

- and hydrological factors. *Hydrol. Sci. J.* 52, 74–85. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.1.74>
- Wrzesiński, D., Graf, R., 2022. Temporal and spatial patterns of the river flow and water temperature relations in Poland. *J. Hydrol. Hydromech.* 70, 12–29. <https://doi.org/10.2478/johh-2021-0033>
- Yang, D., Peterson, A., 2017. River Water Temperature in Relation to Local Air Temperature in the Mackenzie and Yukon Basins. *Arctic* 70, 47–58.
- Yvon-Durocher, G., Caffrey, J.M., Cescatti, A., Dossena, M., del Giorgio, P., Gasol, J.M., Montoya, J.M., Pumpanen, J., Staehr, P.A., Trimmer, M., others, 2012. Reconciling the temperature dependence of respiration across timescales and ecosystem types. *Nature* 487, 472.
- Zhang, X., Li, D., 2001. Trous Wavelet Decomposition Applied to Image Edge Detection. *Ann. GIS* 7, 119–123. <https://doi.org/10.1080/10824000109480563>
- Zhu, S., Du, X., Luo, W., 2019. Incorporation of the simplified equilibrium temperature approach in a hydrodynamic and water quality model–CE-QUAL-W2. *Water Sci. Technol. Water Supply* 19, 156–164.
- Zhu, S., Heddam, S., 2019. Modelling of Maximum Daily Water Temperature for Streams: Optimally Pruned Extreme Learning Machine (OPELM) versus Radial Basis Function Neural Networks (RBFNN). *Environ. Process.* 6, 789–804. <https://doi.org/10.1007/s40710-019-00385-8>
- Zhu, S., Nyarko, E.K., Hadzima-Nyarko, M., 2018. Modelling daily water temperature from air temperature for the Missouri River. *PeerJ* 2018, 1–19. <https://doi.org/10.7717/peerj.4894>
- Zhu, S., Piotrowski, A.P., 2020. River/stream water temperature forecasting using artificial intelligence models: a systematic review. *Acta Geophys.* 1–10.

Simulations des flux d'eau et de chaleur au sein de l'hydrosystème Seine ¹

Agnès Rivière^{1,*}, Deniz Kilic^{1,**}, Nicolas Gallois¹, Agnès Ducharne², Shuaitao Wang², Philippe Peylin³, Nicolas Flipo¹

¹ Mines Paris - PSL, Centre de Géosciences, Fontainebleau, France

² UMR 7619 METIS, Sorbonne Université, CNRS, EPHE, Paris, France

³ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), Gif-sur-Yvette, France

* agnes.riviere@minesparis.psl.eu, ** deniz.kilic@minesparis.psl.eu

Résumé

Dans ce cadre, les équipes du PIREN-Seine ont développé un outil de modélisation intégrée visant à simuler des échanges d'eau et de chaleur entre l'atmosphère et la surface (sol, rivière et lac) et les systèmes aquifères en passant par les interfaces (zone non saturée, interface nappe-rivière et aquitard). Ces développements ont permis le couplage entre ORCHIDEE (développé par l'IPSL) incluant les transferts d'eau et d'énergie depuis l'atmosphère jusqu'à la zone non saturée et CaWaQS (développé par Mines Paris - PSL) simulant l'hydrodynamisme des rivières et du système aquifère. Un outil de transport originale basée sur la résolution de l'équation de transport de diffusion/advection a été développée afin de simuler le transfert de chaleur dans les réseaux hydrographiques et les systèmes aquifères en pseudo-3D. Une solution analytique est utilisée pour simuler le transport de chaleur à travers les aquitards et l'interface nappe-rivière. L'outil permet d'établir un premier bilan d'eau et de chaleur de l'hydrosystème de la Seine. Les résultats permettent d'estimer l'évolution de la température dans chaque compartiment de l'hydrosystème et d'évaluer le bilan thermique des rivières qui repose principalement sur les échanges avec l'atmosphère ($109,3 \text{ W.m}^{-2}$), puis les flux d'échange nappe-rivière ($48,1 \text{ W.m}^{-2}$) et le ruissellement de surface ($22,7 \text{ W.m}^{-2}$).

Points clés

- Bilan d'eau et d'énergie du bassin de la Seine, incluant le système aquifère et le réseau hydrographique
- Simulations couplées des flux d'eau et de chaleur à l'échelle du bassin de la Seine
- Développement de la plateforme ORCHIDEE-CaWaQS3.x

1. Pour citer cet article : Rivière, A., Kilic, D., Gallois, N., Ducharne, A., Wang, S., Peylin, P., Flipo, N., Simulations des flux d'eau et de chaleur au sein de l'hydrosystème Seine, Rapport PIREN-Seine 2022, [doi:10.26047/PIREN.rapp.ann.2022.vol11](https://doi.org/10.26047/PIREN.rapp.ann.2022.vol11)

Abstract

As a common good, water is essential for many uses related to human activities : domestic needs (including drinking water supply), agricultural usages, industrial applications, energy requirements and recreational uses. Urbanization, which concentrates a high population density, as well as the economic activities of the Seine basin generate an increase in water and energy needs. In addition, climate change has an impact on the sustainable management of resources in the long term. A precise understanding of water and energy fluxes at the basin scale is therefore becoming a strategic necessity in order to adapt resource management.

In this context, the PIREN-Seine teams are developing an integrated modelling tool to simulate water and heat exchanges between the atmosphere and the surface (soil, river and lake) and aquifer systems via the interfaces (unsaturated zone, stream-aquifer interface and aquitard). These developments have resulted in the coupling between ORCHIDEE (developed by IPSL) including water and energy transfers from the atmosphere to the unsaturated zone and CaWaQS (developed by Mines Paris - PSL), which simulates the hydrodynamics of rivers and aquifer systems. An original transport numerical tool based on the resolution of the diffusion/advection transport equation has been developed to simulate heat transfer in river networks and aquifer systems in pseudo-3D. An analytical solution is used to simulate heat transport through aquitards and the stream-aquifer interface. The tool allows us to establish a first water and heat balance of the Seine hydrosystem, which estimates the temperature evolution in each compartment of the hydrosystem and evaluates the heat balance of the rivers. The rivers' heat balance is mainly based on air exchanges and solar radiation (109.3 W.m^{-2}), and then water-river exchange flows (48.1 W.m^{-2}) and surface runoff (22.7 W.m^{-2}).

Key points

- Water and energy budget from the atmosphere to the aquifer system
- Coupling simulations of water and heat fluxes inside the Seine basin
- Development of the ORCHIDEE-CaWaQS3.x platform

Introduction

Les hydrosystèmes, définis comme la combinaison superposée de l'atmosphère, de la surface du sol et des systèmes aquifères où l'eau s'écoule, accueillent le cycle de l'eau et constituent une ressource essentielle pour les humains et les écosystèmes. Les hydrosystèmes soutiennent ainsi les écosystèmes et répondent aux besoins sociétaux en eau potable, en énergie et en production alimentaire.

La gestion durable des hydrosystèmes sera sous-tendue dans le futur par notre capacité à anticiper les effets du changement climatique, l'évolution des demandes en eau et des usages énergétiques de l'eau et les nouveaux systèmes de gouvernance relatifs à la gestion des milieux anthropisés (gestion des infrastructures, politiques de développement territorial). Ainsi, il est impératif de décrire aussi précisément que possible les évolutions temporelles et spatiales des transferts de solutés, de chaleur et d'eau dans les différents compartiments tout en tenant compte des changements globaux. Des premières simulations ont été mises en œuvre afin de prédire une évolution possible de l'hydrosystème Seine dans le futur (Boé et al., 2007; Ducharne, 2007; Ducharne et al., 2009; Flipo et al., 2020). Cependant, la compréhension précise de l'impact du changement climatique sur le

cycle de l'eau nécessite l'inclusion du bilan énergétique, car les processus inhérents au cycle de l'eau sont dépendants de celui-ci (Maxwell and Kollet, 2008).

Dans ce cadre, les équipes du PIREN-Seine ont développé un outil de modélisation intégrée visant à simuler des échanges hydriques et thermiques entre l'atmosphère et la surface (sol, rivière et lac) et les systèmes aquifères en passant par les interfaces (zone non saturée, interface nappe-rivière et aquitards). Ces développements ont permis le couplage entre ORCHIDEE (*ORganizing Carbon and Hydrology in Dynamic EcosystEms*), développée par l'IPSL (Krinner et al., 2005; Ducharne et al., 2000, 2020) et CaWaQS (*CAtchment WAter Quality Simulator*, développé par MINES Paris, PSL Université, (Labarthe, 2016; Flipo et al., 2023)). ORCHIDEE est utilisé pour résoudre le bilan hydrique et énergétique des compartiments sol-végétation-atmosphère au pas de temps horaire, tandis que CaWaQS est utilisé pour déterminer les flux d'eau et d'énergie dans les aquifères et les rivières ainsi que les flux d'échange entre leurs différentes interfaces (aquitard, interface, nappe-rivière, atmosphère-rivière). Ce couplage est appliqué à l'hydrosystème Seine. Un travail de déclinaison régionale d'ORCHIDEE à l'échelle de l'hydrosystème Seine, non présenté ici, a d'ores et déjà été réalisé (Kilic et al., 2019, 2021). Ce travail se base sur l'application CaWaQS-Seine qui a récemment été améliorée via l'inclusion de l'ensemble du système aquifère de la frange orientale de l'hydrosystème Seine (Gallois and Flipo, 2021), et l'ajustement des paramètres du système (Flipo et al. (2023)), notamment le fractionnement hydrologique de la pluie efficace en ruissellement et infiltration.

La philosophie du couplage ORCHIDEE-CaWaQS est d'appliquer comme forçages CaWaQS les températures de surface et les flux de recharge et de ruissellement simulés par ORCHIDEE pour simuler explicitement les flux d'eau et de chaleur au sein des rivières et du système aquifère. Dans ce but, une bibliothèque de transport originale basée sur la résolution de l'équation de transport de diffusion/advection a été développée pour simuler le transfert de chaleur dans les réseaux hydrographiques en 1D et les systèmes aquifères en pseudo-3D (Kilic et al., 2021). Une solution analytique est utilisée pour simuler la réactivité thermique des interfaces telles que les aquitards et le lit des cours d'eau (Kurylyk et al., 2017).

Dans ce rapport, l'outil est brièvement présenté, ainsi que la calibration du bilan hydrique de surface. La dynamique et les ordres de grandeur des bilans d'eau et d'énergie sont détaillés dans le cas d'une simulation à long terme, afin de répondre à trois questions de recherche : (i) quel est le fonctionnement hydrologique et thermique de l'hydrosystème de la Seine dans les conditions climatiques actuelles ? (ii) Quelles sont les sources de chaleur prédominantes dans le réseau hydrographique de la Seine ? (iii) Quel est le rôle du ruissellement de surface et des échanges nappe-rivière dans le bilan énergétique de la Seine ?

1 Les outils de modélisation du transfert de chaleur dans les hydrosystèmes

1.1 ORCHIDEE (tag 2.2, rev. 6533)

ORCHIDEE est un modèle SVAT (« *Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer* »), initialement conçu pour être couplé à un modèle atmosphérique de circulation globale (Krinner et al., 2005), mais il peut également être utilisé en mode autonome, en utilisant un jeu de données météorologiques d'entrée. ORCHIDEE tag 2.2 a été développé dans le cadre du modèle IPSL-CM6 (Boucher et al., 2020) pour contribuer à la sixième phase du *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP6) (Eyring et al., 2016).

La résolution horizontale est imposée par la grille atmosphérique, et les bilans énergétiques et hydriques de la surface terrestre sont calculés dans chaque maille à un pas de temps infrahoraire (15 min dans le modèle couplé, 30 min en mode autonome) pour tenir compte des variations diurnes du rayonnement entrant. Ces bilans dépendent fortement de l'occupation du sol, décrite dans chaque maille comme une mosaïque de 15 types fonctionnels de plantes différents (TFP) comprenant le sol nu, les arbres à feuilles persistantes et à feuilles caduques, les prairies C3 et C4 et les cultures. Tous les TFP partagent les mêmes équations, mais avec des paramètres différents. La proportion de chaque TFP est prescrite dans chaque cellule de la grille à partir de

cartes d'occupation du sol dérivées d'observations satellitaires, avec des mises à jour annuelles (Lurton et al., 2020). Deux options sont comparées dans ce travail en ce qui concerne l'évolution de l'indice de surface foliaire (LAI), qui peut être soit prescrit via des cartes d'entrée du LAI mensuel, soit calculé dynamiquement à un pas de temps journalier par le module STOMATE, qui redistribue la production primaire nette (photosynthèse moins respiration autotrophe) en raison de règles d'allocation et de phénologie dépendantes des TFP.

La redistribution verticale de l'humidité du sol est modélisée par une solution multicouche de l'équation de Richards, utilisant un sol de 2 m discrétisé en 11 couches de sol, avec un drainage libre comme condition limite inférieure. L'infiltration et le ruissellement de surface sont dérivés d'une paramétrisation inspirée du modèle de Green-Ampt (D'Orgeval et al., 2008). La diffusivité hydraulique dans la zone non saturée est décrite par les relations de Van Genuchten-Mualem décrivant la variation de saturation en fonction de la pression capillaire dans les sols et la variation de la perméabilité en fonction de la saturation. Dans chaque cellule du modèle, les paramètres correspondants (γ compris la perméabilité à saturation K_{sat} et la porosité) sont déduits de la texture du sol comme détaillé dans Tafasca et al. (2020). La K_{sat} [m/s] subit en outre une décroissance exponentielle verticale pour tenir compte des effets de compaction des sols et de la bioturbation :

$$K_{\text{sat}}(z) = K_{\text{sat}}^* \exp(-c_K(z - z_{\text{lim}})), \quad (1)$$

où z est la profondeur du sol [m], K_{sat}^* est la valeur de référence de la perméabilité K_{sat} basée sur la texture du sol [m/s], z_{lim} est la profondeur à laquelle la diminution de K_{sat} commence (par défaut, égale à 0.3 m), et c_K est le facteur de décroissance [en m^{-1}] (égal à 2 par défaut). L'évapotranspiration est composée de quatre sous flux : la sublimation, la perte par interception, l'évaporation du sol et la transpiration, étroitement couplées à la photosynthèse. L'évaporation et la transpiration du sol dépendent de l'humidité du sol via des facteurs de stress réduisant les taux effectifs par rapport au taux potentiel, qui dépend lui-même d'une résistance aérodynamique (et stomatique pour la transpiration) et du gradient de vapeur d'eau entre la surface et l'atmosphère. L'évapotranspiration E [$\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$] et son équivalent énergétique, le flux de chaleur latente LE [W/m^2], couplent les bilans hydrique et énergétique, calculés à l'échelle de la maille donnée par :

$$C_p \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \alpha_s) R_{\text{SWd}} + R_{\text{LWd}} - \varepsilon \sigma T_s^4 - LE - H - G. \quad (2)$$

La température de surface T_s est la variable pronostique [K], t est le temps [s], C_p est la capacité calorifique de la couche de surface [$\text{J}/\text{K}/\text{m}^3$], tandis que R_{SWd} et R_{LWd} sont les flux de rayonnement descendant d'entrée [w/m^2] dans les longueurs d'onde visibles et infrarouges, respectivement. L'albédo de surface α_s dépend de l'albédo du sol et de chaque TFP, qui sont des paramètres prescrits, et de l'albédo de la neige, calculé en fonction de l'âge de la neige par un module de neige à trois couches (Wang et al., 2013). Enfin, H est le flux de chaleur sensible [w/m^2], et G est le flux de chaleur du sol [w/m^2], qui couple le bilan énergétique de surface au profil de température du sol, résultant d'une équation de diffusion de chaleur en 1D. Le gel du sol est négligé puisque le bassin de la Seine est situé dans un climat tempéré. La discrétisation verticale pour la diffusion de la chaleur est identique à celle adoptée pour les flux d'eau jusqu'à 2 m, puis étendue à 18 m où un flux de chaleur nul est supposé en bas de la colonne de sol. Les propriétés thermiques du sol (capacité calorifique et conductivité thermique) de chaque couche dépendent de l'humidité du sol (en supposant un profil uniforme en dessous de 2 m) et de la texture du sol (Wang et al., 2016).

1.2 CaWaQS (v 3.17)

La plateforme CaWaQS² est un outil numérique permettant la simulation spatio-temporelle de flux d'eau à diverses échelles, en régime permanent et/ou transitoire, au sein d'un hydrosystème (Flipo, 2005; Labarthe, 2016; Flipo et al., 2023). Cet outil a hérité de nombreux concepts de la plateforme de modélisation MODCOU-NEWSAM (de Marsily et al., 1978; Ledoux, 1980). Son application permet de couvrir un large éventail de

2. Développé au Centre de Géosciences, Mines Paris - PSL, disponible sous licence *open-source* EPL v2, CaWaQS est accessible à l'adresse <https://gitlab.com/cawaqs/cawaqs>. Pour plus d'informations, une [fiche 'outils du PIREN-Seine'](#) dédiée est consultable sur le site du PIREN-Seine.

problématiques, de la prospective sur les impacts du changement climatique sur la trajectoire hydrologique du bassin de la Seine aux enjeux de remontées de nappe en agglomération parisienne (Maillot, 2019), en passant par l'étude d'impacts environnementaux autour de l'exploitation des gravières (Wang et al., 2016) ou encore de la pollution diffuse d'origine agricole (Beaudoin et al., 2018; Gallois and Viennot, 2018). CaWaQS couple un ensemble de bibliothèques autonomes, offrant une structure modulaire à l'utilisateur qui peut sélectionner les compartiments de l'hydrosystème qu'il souhaite modéliser. Quatre librairies dédiées à ces compartiments constituent le cœur de la plateforme CaWaQS :

- Le module *libfp* (cf. Fig 1.A) calcule le bilan hydrique de surface au pas de temps journalier. Cette librairie permet de calculer l'évapotranspiration réelle, d'évaluer le stock d'eau dans le sol, de caractériser l'infiltration et le ruissellement à partir de données de précipitation et d'évapotranspiration potentielle. Le ruissellement est transféré jusqu'au réseau hydrographique de manière directe. Cette conceptualisation tend à négliger le temps de transfert entre le point de production du ruissellement hypodermique et le tronçon du réseau hydrographique le plus proche. Pour ce faire, le maillage de surface, support du transfert d'eau de surface, correspond à celui de bassins versants unitaires dont le temps de transfert est supposé inférieur au pas de temps de calcul (pas de temps journalier)
- le module *libhyd* (cf. Fig 1.B) simule les écoulements au sein du réseau rivière, selon le schéma de Muskingum (Cunge, 1969) (cf. Fig 1.D). Le ruissellement produit localement est distribué de manière homogène le long de chaque tronçon du réseau. L'épaisseur de la colonne d'eau dans la rivière est calculée par la méthode de Manning-Strickler.
- Le module *libnsat* (cf. Fig 1.C) transfère verticalement, dans la zone non saturée, les flux d'eau infiltrés calculés par le module de surface. Le transfert vertical est conceptualisé par une succession de réservoirs, de volumes et de coefficients de vidange renseignés basée sur la méthodologie développée par Nash (1959). Les flux calculés en base de ce compartiment sont par suite transférés comme recharge à la zone saturée (aquifère), soit par transfert vertical direct soit après routage.
- Le module *libaq* simule (cf. Fig 1.E) l'écoulement de l'eau dans un système aquifère multicouche, selon une discrétisation semi-implicite, par différences finies. L'équation de diffusivité est résolue sous une forme pseudo-3D. Un support de cette résolution par maillage gigogne est possible pour affiner la résolution en relation avec les couches supérieures et inférieures. Le lien entre les couches du système aquifère est établi par le concept de drainance (cf. Fig 1.H), analogue à celui de conductance, utilisé dans la simulation des échanges nappe-rivière (cf. Fig 1.G).
- Le module *libseb* simule, à partir de données météorologiques spatio-temporelles, le bilan global des échanges thermiques à l'interface eau/atmosphère.
- Le module *libttc* (cf. Fig 1.F) simule le transport d'énergie et de soluté dissous en milieu poreux (aquifères) et également en écoulement à surface libre (cours d'eau et rivières). Il permet le transport simultané, dans les différents compartiments des hydrosystèmes, de n espèces dissoutes. Cette fonctionnalité est essentielle, notamment dans une optique future d'intégration du transport réactif entre espèces et en relation avec la température. Ce module permet un niveau de flexibilité additionnel sur le pas de temps de simulation. Celui-ci est adaptable dans le but d'obtenir une meilleure représentation des processus physiques de chaque compartiment des hydrosystèmes en tenant compte de leurs temps caractéristiques.

Dans le cadre du présent travail, la possibilité a été programmée de coupler CaWaQS avec un modèle de surface terrestre (LSM - *Land Surface Model*) en définissant les cartes de forçages de recharge et de ruissellement, de concentration et/ou de température à partir de ces modèles de surface.

1.3 Stratégie de couplage des modèles

Le couplage est réalisé *via* une procédure de forçage "*offline*", par laquelle les modèles impliqués sont exécutés de manière séquentielle, ne permettant ainsi qu'une interaction monodirectionnelle, d'ORCHIDEE vers CaWaQS.

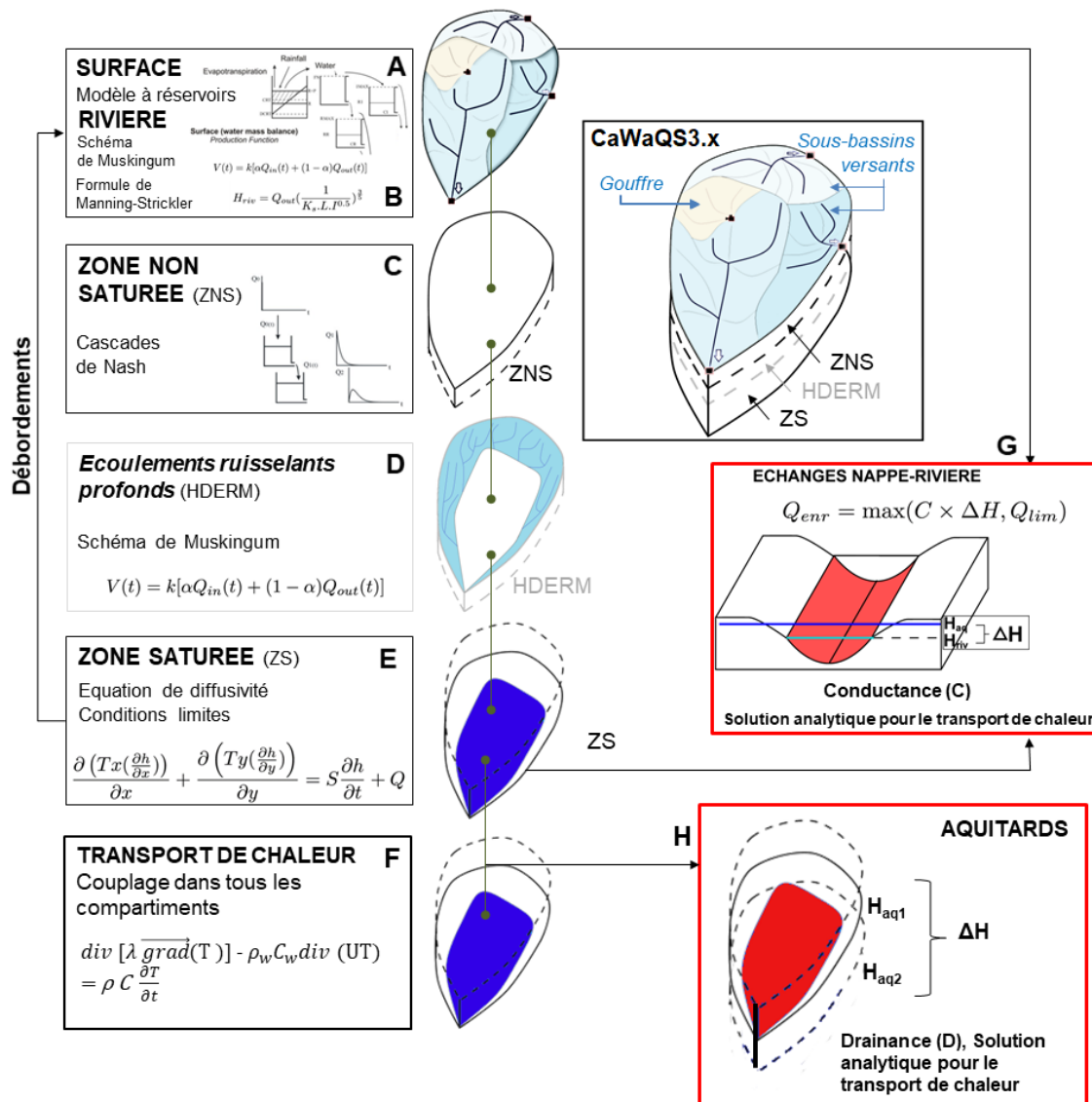


Figure 1. Schématisation de la structure de la plateforme CaWaQS3.x de modélisation de flux d'eau et de chaleur.

Les flux de drainage simulés par ORCHIDEE sont prescrits comme une recharge de l'aquifère dans CaWaQS, avec une température égale à celle du sol à 2 m de profondeur, tandis que le ruissellement de surface est acheminé vers le réseau hydrographique, en supposant que sa température est en équilibre avec celle de la surface du sol (0,001 m de profondeur, couche supérieure).

2 L'hydrosystème Seine

L'hydrosystème Seine ($\approx 76\,375\text{ km}^2$) est situé dans le bassin sédimentaire de Paris. Le contexte géologique est constitué de formations sédimentaires du Tertiaire (alternance d'argile, de grès et de calcaire), de craie du Crétacé et de calcaires du Jurassique reposant sur un socle cristallin, affleurant principalement à l'extrême limite sud-est (Morvan) et nord-est (Ardennes) du bassin. L'altitude la plus élevée est de 856 m et 90 % du bassin est situé en dessous de 300 m d'altitude. Le réseau hydrographique présente des pentes douces.

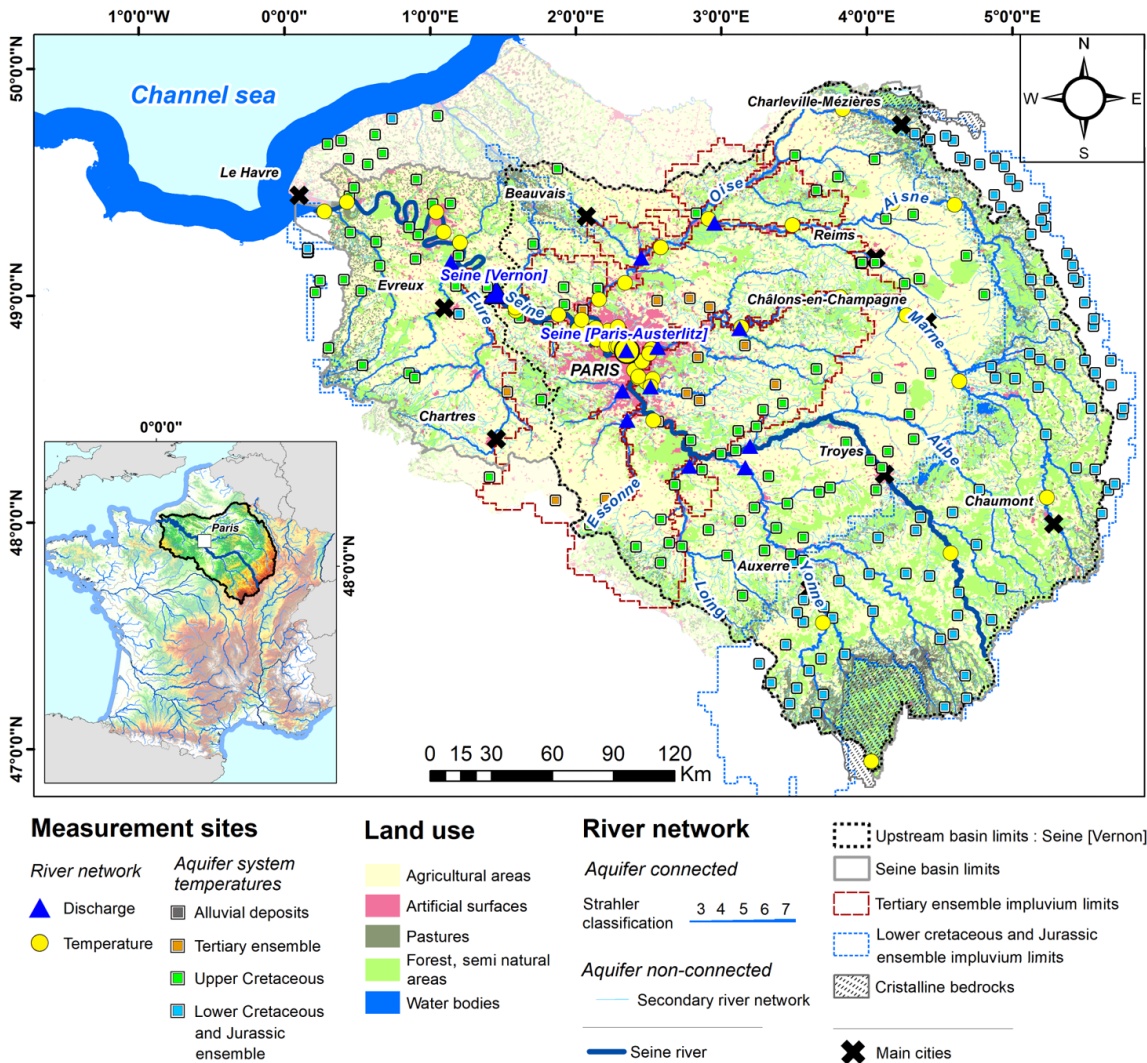


Figure 2. Vue d'ensemble du bassin de la Seine (76 375 km²). L'occupation des sols, utilisée comme fond de carte, est fournie par la base de données CorineLandCover de 2018. Les triangles bleus et les cercles jaunes représentent les positions de mesure du débit et de la température des rivières, respectivement. Les lignes pointillées de couleur indiquent l'étendue de l'ensemble du système aquifère. Les stations de mesure de la température des aquifères sont regroupées en fonction de l'ensemble aquifère auquel elles sont associées.

Le régime climatique est tempéré, modulé par les variations saisonnières de l'évapotranspiration. Le taux de précipitations annuel moyen est de 825 mm sur la période 1980-2020 (jeu de données SAFRAN, Vidal et al. (2010)). Le débit moyen de la Seine aval à la station de jaugeage de Vernon avant l'estuaire était de 490 m³ s⁻¹ sur la période 1980-2020 (base de données HYDRO).

Actuellement, le bassin de la Seine est le bassin le plus urbanisé et le plus industrialisé de France. La population est constituée de 17 millions d'habitants (25 % de la population nationale), dont 10 millions pour la seule agglomération parisienne. Le bassin concentre 40 % des activités industrielles nationales, tandis qu'une large zone autour de l'immense agglomération parisienne est orientée vers la production industrielle de culture de céréales (Figure 2). Ces activités présentent une demande énergétique conséquente. De plus, compte tenu de l'importance de la population et de la production alimentaire du bassin de la Seine, les ressources en eau sont stratégiques, près de 1 million de mètres cubes d'eau souterraine étant extraits chaque année sur l'ensemble du bassin (Fliipo et al., 2023).

2.1 Conception de l'application ORCHIDEE-CaWaQS de l'hydrosystème Seine

La plateforme ORCHIDEE-CaWaQS a été appliquée sur la période 2001-2018, qui a été marquée par des événements de crue remarquables (ex. hiver/printemps 2001, hiver 2016-2018) ainsi que par des périodes de débit extrêmement faible/sécheresse et des vagues de chaleur (ex. été 2003, été 2006-2007).

2.1.1 Application ORCHIDEE de l'hydrosystème Seine

ORCHIDEE est forcée avec le jeu de données météorologiques de la base de données SAFRAN (Vidal et al., 2010). Les forçages utilisés sont les variables atmosphériques à un pas de temps horaire, sur une grille régulière de 8×8 . Cette grille définit le maillage de l'application Seine. Un total de 1 490 cellules est utilisé pour décrire le domaine de l'hydrosystème Seine. Une concentration constante de dioxyde de carbone (370 ppm) sur la période 1980-2018 a été appliquée.

La carte de distribution de la végétation a été dérivée à une résolution de 0,5 degré à partir du jeu de données ESA-CCI Land Cover à une résolution de 300 m, pour la période 1992-2015 (voir les détails dans Lurton et al. (2020)). La distribution de la végétation en dehors de cette période a été fixée à celle de l'année disponible la plus proche avec une distribution de végétation constante. Les valeurs mensuelles de l'indice foliaire (LAI) ont été obtenues à partir de la simulation globale existante sur 40 ans réalisée en mode autonome à $0,5^\circ$ (55 de résolution). La carte de l'albédo du sol a été dérivée de l'ensemble de données MODIS agrégées à une résolution de 0,5 degré. Les cartes de distribution de la couverture du sol ont été obtenues à partir de quatre sources : Reynolds (Reynolds et al., 2000), SoilGrids (Hengl et al., 2017), LUCAS (Ballabio et al., 2016), et INRA (Jolivet et al., 2006). L'état initial a été obtenu après une période d'initialisation de cinq ans (1980-1985) afin d'atteindre l'état d'équilibre du modèle de surface de l'humidité et de la température du sol.

2.1.2 Application CaWaQS-Seine

L'application CaWaQS préexistante de l'hydrosystème Seine développée par Flipo et al. (2023) est utilisée. Celle-ci considère les principales unités aquifères en interaction avec la Seine et ses principaux affluents (Ordre de Strahler >3). Du plus ancien au plus récent, ces aquifères peuvent être regroupés selon quatre grands ensembles : (i) un ensemble d'unités aquifères et aquitardes, allant du Jurassique inférieur (étage de Hettangien) au Crétacé inférieur (étage de l'Albien), (ii) le grand aquifère crayeux du Crétacé supérieur, (iii) un complexe d'aquifères du tertiaire comprenant cinq couches aquifères datant de l'époque du Paléocène à l'époque du Miocène et (iv) des dépôts alluviaux récents (Pléistocène, Holocène). La résolution des cellules des CaWaQS aquifères varie entre 100 m et 3 200 m en utilisant une approche de grille gigogne. La géométrie du réseau hydrographique a été obtenue à partir de la base de données SYRAH-CE (Chandesris et al., 2008). Les entrées d'eau du réseau hydrographique tiennent compte du ruissellement de subsurface, des débordements de l'aquifère vers la surface du sol ainsi que des échanges nappe-rivière. Principalement pour des raisons de temps de calcul, les calculs d'échanges nappe-rivière ont été limités au réseau hydrographique principal, qui correspond aux tronçons de rivière avec un ordre de Strahler supérieur ou égal à 3 (Figure 2). La paramétrisation thermique (conductivités thermiques, capacités calorifiques et porosités) du bassin de la Seine a été extraite de Dentzer (2016) et Rivière (2012). Le transport de chaleur a également été simulé dans les tronçons de rivière avec un ordre de Strahler supérieur ou égal à 3 (Figure 2). Les températures de surface du sol simulées avec ORCHIDEE ont été imposées aux tronçons de rivière inférieurs à l'ordre de Strahler 3. L'état initial de température du système aquifère a été obtenu en faisant tourner le modèle couplé pendant 40 ans en simulant 2 fois la période 1985-2005.

Les forçages de CaWaQS ont été définis comme suit : (i) un flux nul en écoulement est imposé aux limites inférieures et aux limites du domaine, sauf pour les mailles rivière où la hauteur d'eau de la maille rivière adjacente est imposée ; (ii) Les prélèvements d'eau souterraine sont pris en compte sous la forme d'un débit de

pompage journalier, les valeurs provenant des données annuelles de prélèvement d'eau souterraine de l'Agence de l'eau Seine-Normandie (AESN) pour les besoins domestiques, industriels et agricoles ; **(iii)** Les prélèvements agricoles sont supposés avoir lieu uniquement pendant la période estivale (*i.e.* le volume d'eau d'irrigation est distribué temporellement comme suit : 20% en mai, 30% en juin et juillet, et 20% en août) ; **(iv)** Un flux nul de chaleur est imposé aux limites horizontales du domaine ; des températures sont imposées selon la méthodologie de couplage décrite précédemment aux systèmes de surfaces ; Un flux géothermique est imposé pour la limite inférieure du domaine (75 mWm^{-2} , [Dentzer \(2016\)](#)).

2.2 Calibration de la plateforme ORCHIDEE-CaWaQS

Une procédure de calibration en deux étapes a été utilisée pour calibrer le bilan d'eau et de chaleur de l'hydrosystème Seine : d'abord le bilan de surface et ensuite le bilan sous-terrain. Compte tenu de l'impact de l'oscillation nord-atlantique (NAO) sur la variation des eaux souterraines ([Flipo et al., 2012](#); [Massei et al., 2010](#)), une période de moyenne de 17 ans entre 2001-2018 a été sélectionnée pour mener la première étape de calibration.

2.2.1 Calibration du bilan de surface

L'étape de calibration du bilan d'eau de surface consiste en des ajustements itératifs par essais et erreurs des paramètres d'ORCHIDEE afin de minimiser le biais entre le débit moyen pluriannuel simulé et observé aux différentes stations de jaugeage (Figure 2) et de garantir une contribution des eaux souterraines à l'exutoire du bassin d'environ $\frac{2}{3}$, telle que récemment réévaluée par [Flipo et al. \(2023\)](#). Le débit moyen pluriannuel est estimé en multipliant le ruissellement total par la superficie du bassin ainsi que la recharge des aquifères corrigée des prélèvements annuels d'eau souterraine (équivalent à une moyenne annuelle de $37 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pendant la période 2008-2012, AESN).

Un ensemble de 10 simulations ORCHIDEE a été choisi pour illustrer ce processus itératif (Tableau 1). Tout d'abord, EXP1 à EXP4 nous permettent d'évaluer l'influence de la carte de distribution des sols (avec une carte LAI prescrite et des paramètres par défaut, tels qu'utilisés à l'échelle globale pour CMIP6). Ensuite, les deux options disponibles pour tenir compte des variations du LAI (carte prescrite vs simulation dynamique par le module STOMATE) peuvent être évaluées en comparant EXP4 et EXP5. Enfin, EXP5 à EXP10 ne diffèrent que par certains paramètres ORCHIDEE jugés pertinents par plusieurs analyses de sensibilité (par ex. [Raoult et al. \(2021\)](#)) : la perméabilité à saturation (K_{sat}) attribuée aux différents types de sol dominant dans le bassin de la Seine (sable silteux, silt, argile silteuse) et leur facteur de diminution de la perméabilité c_K (Eq. 1); l'albédo foliaire dans le visible et le proche infrarouge et le LAI maximum des principales TFP du bassin. Il faut noter qu'aucune calibration n'a été effectuée pour améliorer les flux thermiques. Les températures des couches inférieures et supérieures du sol ont été supposées être en équilibre avec les températures de la recharge (drainage) et du ruissellement de surface, respectivement.

2.2.2 Calibration du bilan souterrain

Les paramètres géométriques et physiques du réseau hydrographique et du système aquifère de la Seine sont fournis par [Flipo et al. \(2023\)](#). Aucune calibration supplémentaire des paramètres hydrogéologiques n'a été réalisée. La distribution et la valeur des paramètres thermiques utilisés ont été tirés de [Dentzer \(2016\)](#) et [Rivière \(2012\)](#) en moyennant les valeurs par couche aquifère. Le bilan thermique de la rivière a été calibré en modifiant le facteur d'ombrage uniforme allant de 0 % à 50 % appliqué sur le rayonnement net entrant ([Beaufort et al., 2016](#)). Un ombrage uniforme de 30 %, cohérent avec les valeurs rapportées dans [Loicq et al. \(2018\)](#), a été sélectionné après une série de simulations.

Tableau 1. Jeu de paramètres appliqué aux 10 expériences pour calibrer le modèle ORCHIDEE (- : même valeur que la précédente, R : Reynolds, SG : SoilGrids, L : Lucas, I : INRA, pLAI : LAI prescrit, ST : STOMATE activé, TeBS : Temperature Boreal Summerreen Trees, TeBe : Temperate Boreal Evergreen Trees, NC3 : Natural C₃ grass, AC3 : Agricultural C₃ crops)

Experiment		EXP1	EXP2	EXP3	EXP4	EXP5	EXP6	EXP7	EXP8	EXP9	EXP10
Distribution des sols		I	SG	L	R	R	R	R	R	R	R
Modèle de végétation		pLAI	pLAI	pLAI	pLAI	ST	ST	ST	ST	ST	ST
Parametre	Classe										
c_K		2	-	-	-	-	4	-	-	10	-
K_{sat} (m s ⁻¹)	Loamy Sand	4.05×10^{-5}	-	-	-	-	-	-	1.73×10^{-5}	-	-
	Silt	2.88×10^{-6}	-	-	-	-	-	-	1.50×10^{-6}	-	-
	Argile										
	Silt	7.22×10^{-7}	-	-	-	-	-	-	4.62×10^{-7}	-	-
Proche-Infrarouge Albedo foliaire	TeBE	0.22	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-
	TeBS	0.22	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-
	NC3	0.3	-	-	-	-	-	0.25	-	-	-
	AC3	0.3	-	-	-	-	-	0.1	-	-	-
Rayonnement-Visible Albedo foliaire	TeBE	0.06	-	-	-	-	-	0.04	-	-	-
	TeBS	0.06	-	-	-	-	-	0.04	-	-	-
	NC3	0.1	-	-	-	-	-	0.05	-	-	-
	AC3	0.1	-	-	-	-	-	0.04	-	-	-
Maximum LAI	TeBE	4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	5.5
	TeBS	4	-	-	-	-	-	-	-	-	5
	NC3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	3
	AC3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	3

2.2.3 Méthodologie d'évaluation

Pour valider les performances de la plateforme ORCHIDEE-CaWaQS, les résultats de l'application ont été comparés à l'ensemble des niveaux piézométriques et des débits mesurés sur le réseau hydrographique, ainsi qu'à des données de température de la rivière, répartie sur l'ensemble de l'hydrosystème Seine (Figure 2). Le coefficient de Kling-Gupta (KGE), l'erreur quadratique moyenne ($RMSE$), l'erreur absolue moyenne (MAE), le pourcentage de biais ($PBIAS$) et le coefficient de corrélation de Pearson (CC) ont été calculés pour évaluer quantitativement l'application Seine sur la période 2001-2018. Les variables collectées sont les données de débit de 183 stations de jaugeage; les données de niveaux piézométriques de 267 piézomètres ont été utilisées pour évaluer les statistiques de performance de la partie hydrologie. Les chroniques ont été obtenues à partir des bases de données [ADES](#) et [HYDRO](#).

Les données sur la température de l'eau des rivières ont été rassemblées par William Thomas de la DRIEAT, à partir de diverses agences opérant dans le bassin; l'ensemble de données comprend des observations horaires et quotidiennes provenant de 62 sites ([Rivière et al., 2021](#)). Pendant la période de simulation (2001-2018), 48 stations avec des observations horaires ont été sélectionnées. Les données de température des aquifères utilisées ont été obtenues à partir de la base de données nationale [ADES](#). Bien que cette dernière fournisse une grande quantité de données, les enregistrements sont souvent incomplets et hétérogènes. La majorité des données de température en aquifère ne sont malheureusement pas consolidées. Un pré-traitement a donc été appliqué à l'ensemble des données en utilisant la méthode de l'écart inter-quartile (IQR), comme décrit dans [Hemmerle et al. \(2019\)](#). Sur le jeu de données initial de 9 179 stations sur la région Seine-Normandie, il restait après le pré-traitement 211 stations avec un minimum de 40 observations sur la période de simulation.

3 Résultats et discussions

3.1 Calibration du bilan de surface

Le bilan d'eau de surface des différentes expériences obtenues est présenté dans la figure 3. Les résultats montrent l'influence des paramètres (Tableau 1) dans le partage des précipitations en évapotranspiration réelle (ETR) et en pluie efficace, qui est composée du ruissellement de surface et de la recharge des aquifères (drainage de la colonne de sol). Il a été choisi de présenter les simulations qui ont le plus d'impact sur les bilans d'eau.

3.1.1 Distribution des sols

Les quatre premières simulations (EXP1-4) montrent l'impact de la distribution des sols, qui induit une variation de 6% de l'ETR (valeurs moyennes comprises entre 469 et 497 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$), et une modification de la pluie efficace. La distribution des sols a également un impact sur le partage de la pluie efficace entre le drainage et le ruissellement de surface, qui varie entre 20 et 47% de la pluie efficace entre EXP4 (Reynolds) et EXP2 (SoilGrids). Ceci s'explique par la composition des distributions de sols : en effet, les cartes SoilGrids et INRA comprennent une fraction importante de sols limoneux qui augmentent le ruissellement de surface au détriment du drainage (Tafasca et al., 2020). Le biais des débits de Vernon est le plus faible dans l'EXP4 qui utilise la carte de texture de sol de Reynolds. Par conséquent, cette carte a été retenue comme référence pour les autres expériences de calibration.

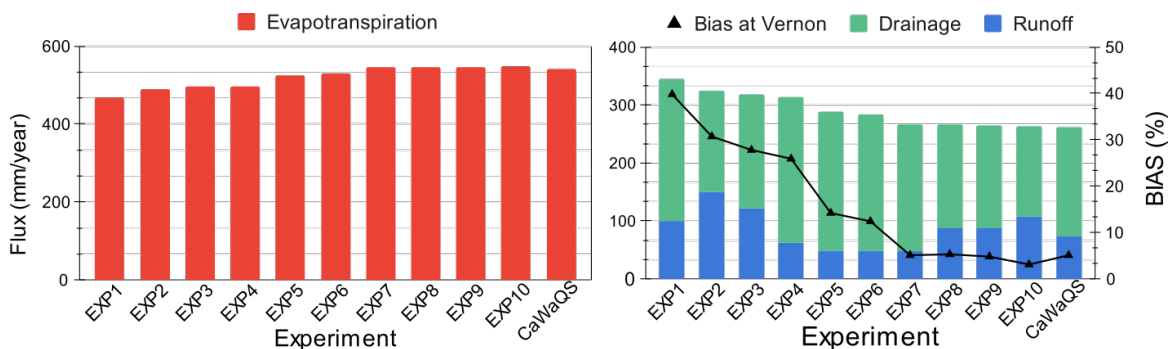


Figure 3. Composantes du bilan annuel moyen des eaux de surface calculées par ORCHIDEE en $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$. Le biais a été calculé sur le débit moyen pluriannuel à la station de mesure de Vernon après que le retrait des prélèvements d'eau annuels moyens. La colonne CaWaQS représente le bilan hydrique calculé par l'application CaWaQS-Seine.

3.1.2 Influence de la végétation

Le calcul de la dynamique de la végétation par le module STOMATE (EXP5) permet une nouvelle représentation de l'évapotranspiration réelle (ETR = +26 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$) par rapport aux simulations avec LAI prescrit (EXP1-4). STOMATE calcule un LAI plus élevé que celui prescrit, ce qui permet d'augmenter l'évapotranspiration via une biomasse plus importante pendant la saison de croissance. La diminution de la pluie efficace qui en résulte entraîne une réduction du biais du débit de Vernon, qui passe de 25,9 % à 14,2 %. La faible diminution de la contribution du ruissellement de surface à la pluie efficace (-3%) peut être attribuée au compromis entre le ruissellement de surface, l'effet de la végétation et le prélèvement d'eau par les racines dans la couche arable.

La réduction de l'albédo des feuilles dans le proche infrarouge et dans le visible (de l'EXP6 à l'EXP7) entraîne également une augmentation significative de l'évapotranspiration réelle (+6,16 mm.a⁻¹, c'est-à-dire +5%), car elle augmente l'énergie nette disponible. Cela entraîne une diminution du biais du débit de Vernon (5,1% dans l'EXP7).

En revanche, la mise en œuvre d'une décroissance verticale plus marquée de la perméabilité K_{sat} en dessous de 30 cm dans la colonne de sol (de EXP5 à EXP6) a montré un faible impact : l'ETR s'est en effet légèrement amélioré de seulement 4 mm.a⁻¹, le biais du débit a diminué 1.8 %. Cette faible sensibilité aux modifications du profil vertical de K_{sat} montre l'importance des 30 premiers cm de la colonne de sol sur le bilan d'eau de surface (De Rosnay et al., 2000).

3.1.3 Influence des valeurs des propriétés physiques des sols

La diminution de K_{sat} pour toutes les textures de sol dominantes (EXP7 à EXP8) a eu un impact encore plus faible sur l'évapotranspiration, sur la pluie efficace et sur le biais du débit (même légèrement aggravé). La diminution de K_{sat} a toutefois eu un impact significatif sur la répartition de la pluie efficace, puisqu'elle a presque doublé la contribution du ruissellement de surface (de 18% à 33 %). La diminution supplémentaire de K_{sat} dans la partie inférieure du sol en augmentant le facteur de décomposition c_K à 10 (EXP9) n'a eu aucun impact sur le bilan d'eau de surface, et l'augmentation du LAI maximum (EXP 10) a eu un effet très limité sur l'ETR et le ruissellement total bien qu'elle ait augmenté la proportion du ruissellement de surface (+ 10 %). Les valeurs maximales du LAI dans toutes les simulations, y compris EXP10, correspondent aux plages de LAI observées dans l'ensemble du réseau FluxNET pour des biomes et des climats similaires (Krinner et al., 2005). Une calibration détaillée des propriétés de la végétation dépasse le cadre de cette étude, bien que les moyens d'améliorer la représentation de la biosphère terrestre et les processus énergétiques dans les modèles SVAT soient des domaines de recherche actifs (Peylin et al., 2016). En définitive, ces résultats montrent que la surestimation du débit à la sortie de Vernon résulte d'une sous-estimation de l'ETR. Les calculs dynamiques de l'indice LAI ont permis d'améliorer considérablement le débit, ce qui peut être attribué en partie à la résolution grossière de la carte LAI d'entrée dans les simulations pLAI, et à un meilleur cycle saisonnier du LAI (comparaison avec le produit GiMMS (Zhu et al., 2013) non montré), plus cohérent avec le forçage météorologique SAFRAN. Bien que les prélèvements d'eau souterraine soient pris en compte dans le calcul du biais de décharge d'ORCHIDEE (voir section 2.2), l'absence d'irrigation dans les simulations peut également contribuer à la sous-estimation de l'ETR et à la surestimation de la décharge des rivières puisque l'augmentation de l'ETR par les prélèvements d'eau de surface est négligée. Si l'on considère que ORCHIDEE simule un bassin naturel contrairement au bassin de la Seine fortement réglementé et irrigué, un biais de 3,1% (EXP10) à la sortie du bassin (Vernon) est très satisfaisant. Cependant, lorsque les proportions d'infiltration et de ruissellement de surface sont considérées (voir section 2.2), EXP9 est plus performant avec près de deux tiers de la recharge contribuant au ruissellement total.

3.2 Performance de la plateforme ORCHIDEE-CaWaQS

La simulation ORCHIDEE la plus performante en termes de biais de débit de rivière et de partitionnement de la pluie effective (EXP9) a été sélectionnée pour forcer la simulation CaWaQS. Une simulation couplée a été réalisée sur la période de 17 ans (août 2001 - juillet 2018). Le débit simulé est comparé de manière satisfaisante au débit observé dans 14 sous-bassins versants principaux, comme illustré à l'exutoire du bassin de la Seine (Vernon) dans la figure 4.a. Bien que les faibles débits soient légèrement surestimés par le modèle couplé, celui-ci capture correctement la dynamique annuelle ($KGE = 0,77$, $CC = 0,82$) et le volume moyen ($PBIAS = 1,6\%$), sachant que l'erreur de mesure du débit du fleuve peut atteindre 20% (Sauer and Meyer, 1992).

La température des cours d'eau est également bien simulée le long du bassin de la Seine, comme l'illustre la station de Paris-Austerlitz (Figure 4.b). Les températures simulées correspondent aux températures observées

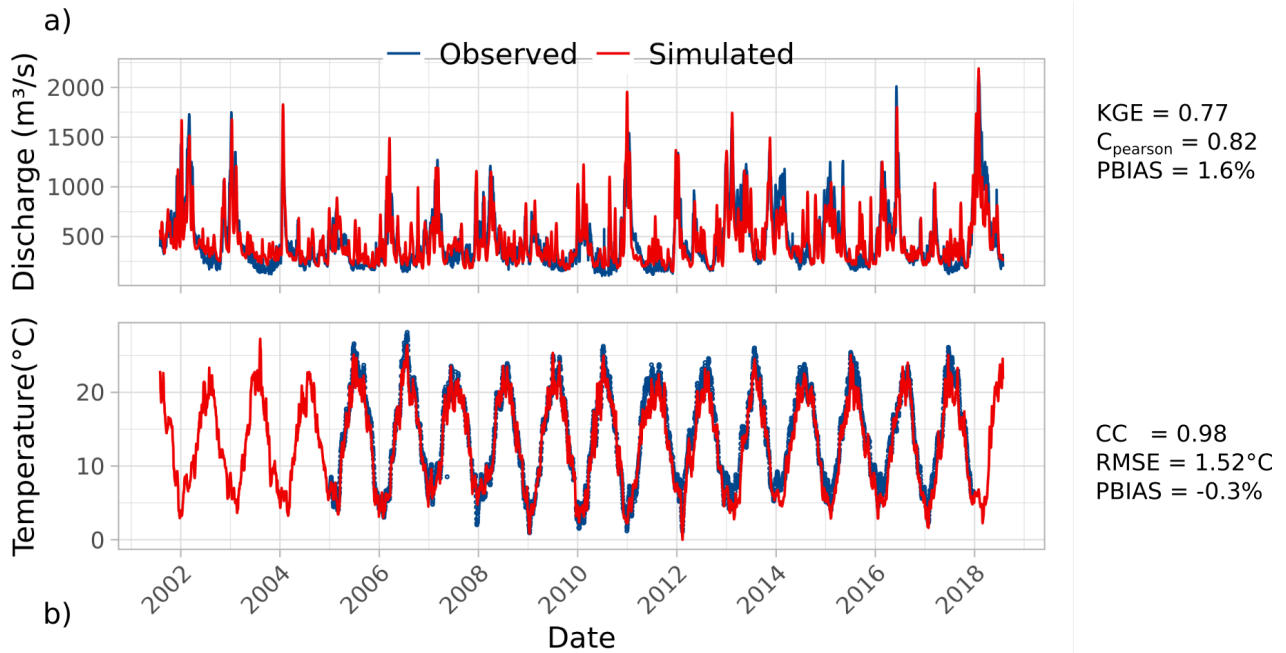


Figure 4. Comparaison sur la période août 2001-juillet 2018 entre a) le débit simulé (rouge) et observé (bleu) à la sortie du bassin versant de la Seine (Vernon); b) la température simulée (rouge) et observée (bleu) du fleuve à Paris (Austerlitz). Les années sont indiquées au 1er janvier. KGE : Coefficient d'efficacité de Kling-Gupta; CC : coefficient de corrélation; PBIAS : Pourcentage de biais; RMSE : Erreur quadratique moyenne.

($CC = 0,98$) avec un $PBIAS$ de $-0,3\%$ et une $RMSE$ de $1,52^{\circ}\text{C}$, bien que les températures simulées soient généralement sous-estimées en été comme en hiver. Une partie de cette incertitude peut être attribuée au facteur d'ombrage uniforme ou à l'absence de structures urbaines qui modifient artificiellement le régime thermique sur les berges (Grant, 2007). Le modèle utilise également un facteur d'ombrage uniforme et constant dans le temps qui s'écarte de la dynamique saisonnière et de la distribution spatiale de la végétation dans le bassin de la Seine (Figure 2). Les performances du modèle évaluées respectivement par rapport aux sondes de température des cours d'eau et des aquifères sur la période de simulation sont fournies dans les tableaux 2 et 3.

La dynamique du transport de chaleur dans le réseau hydrographique est bien représentée ($CC > 0,7$ pour 100% des stations) et MAE est inférieur à 2°C pour 65% des stations. 96% des stations de température de rivière ont une $RMSE$ inférieure à 4°C . Les températures de l'eau dans les ruisseaux et les petites rivières ($< 10\,000\text{ km}^2$) présentent une $RMSE$ moyenne plus élevée ($2,58^{\circ}\text{C}$) que les stations en aval ($< 10\,000\text{ km}^2$) ($1,58^{\circ}\text{C}$). Les températures imposées sur les tronçons de rivière dont l'ordre de Strahler est inférieur à 3 influencent fortement les températures des cours d'eau et des petites rivières et contribuent ainsi à obtenir une $RMSE$ plus élevée, car la proportion de tronçons avec une température prescrite est plus importante que celle des tronçons en aval. Une $RMSE$ relativement élevée indique une inadéquation entre les températures simulées et observées à l'échelle quotidienne. Globalement, la dynamique saisonnière est bien représentée dans le réseau hydrographique (figure 4.b). Le transport de chaleur dans la rivière est comparable à d'autres études à l'échelle régionale utilisant la méthode de la température d'équilibre (Beaufort et al., 2016) en termes de $RMSE$.

Les températures des eaux souterraines montrent une bonne adéquation puisque la $RMSE$ est inférieure à 2°C pour 49% des stations. La $RMSE$ médiane calculée pour les observations de l'aquifère était de $2,12^{\circ}\text{C}$ (variant entre $20,2$ et $0,01^{\circ}\text{C}$). Les $RMSE$ élevées sont concentrées sur l'aquifère jurassique, ce qui est dû en grande partie à un décalage entre la profondeur du puits et la profondeur de la cellule. Seulement 22% des stations présentent un coefficient de corrélation supérieur à 0,5 et seuls 3 % des stations présentent une performance KGE supérieure à 0,5. Le facteur limitant en termes de dynamique est le manque de séries

Tableau 2. Critères statistiques (période 2001-2018) de 48 sondes de température de cours d'eau réparties dans le bassin. Tableau supérieur : Erreur quadratique moyenne (RMSE), erreur absolue moyenne (MAE). Tableau inférieur : Coefficient de corrélation de Pearson (CC), et coefficient d'efficacité de Kling-Gupta (KGE).

Intervalle [°C]	Nombre de station		Pourcentage cumulé [%]	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE
[0.0-2.0[	31	42	65	88
[2.0-4.0[	15	1	96	90
[4.0-6.0[	2	2	100	94
[6.0-8.0[	0	3	100	100

Intervalle [°C]	Nombre de station		Pourcentage cumulé [%]	
	CC	KGE	CC	KGE
]0.7-1.0]	48	43	100	90
]0.5-0.7]	0	2	100	94
]0.4-0.5]	0	1	100	96
]0.2-0.4]	0	2	100	100

temporelles suffisantes dans le système aquifère. En ce qui concerne les hypothèses pour les estimations des conditions aux limites supérieures du transport de chaleur dans le système d'eau souterraine, les températures du sol simulées à 2 m de profondeur à partir d'ORCHIDEE ont été appliquées à la limite supérieure du système d'eau souterraine, qui sont assez différentes des températures réelles de l'eau souterraine à la nappe phréatique (Anderson, 2005).

Tableau 3. Critères statistiques (période 2001-2018) à partir de 211 sondes de température de l'aquifère réparties dans le bassin. Erreur quadratique moyenne (RMSE), erreur absolue moyenne (MAE).

Intervalle [°C]	Nombre de piézomètres [-]		Pourcentage cumulé [%]	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE
[0.0-2.0[	93	115	44	49
[2.0-4.0[	58	59	71	74
[4.0-6.0[	16	17	79	81
[6.0-8.0[	17	17	87	88
[8.0-10.0[	8	9	91	92
>=10	20	19	100	100

4 Fonctionnement hydrologique et thermique de l'hydrosystème de la Seine

Les résultats de la meilleure simulation ORCHIDEE-CaWaQS ont été utilisés pour calculer le bilan hydrique (Fig. 5) et le bilan énergétique (Fig. 6) de l'ensemble du bassin de la Seine, y compris les contributions des eaux souterraines, sur la période 2001-2018.

4.1 Pluri-annual water budget

La figure 5 présente un bilan hydrique pluriannuel du bassin de la Seine. L'ETR y représente 73,5 % (559 mm.a⁻¹) des précipitations (760 mm.a⁻¹). Le reste de la pluie effective (201 mm.a⁻¹) est réparti entre le ruissellement de surface et la recharge des nappes phréatiques, ce qui représente respectivement 34,6 % et 65,3

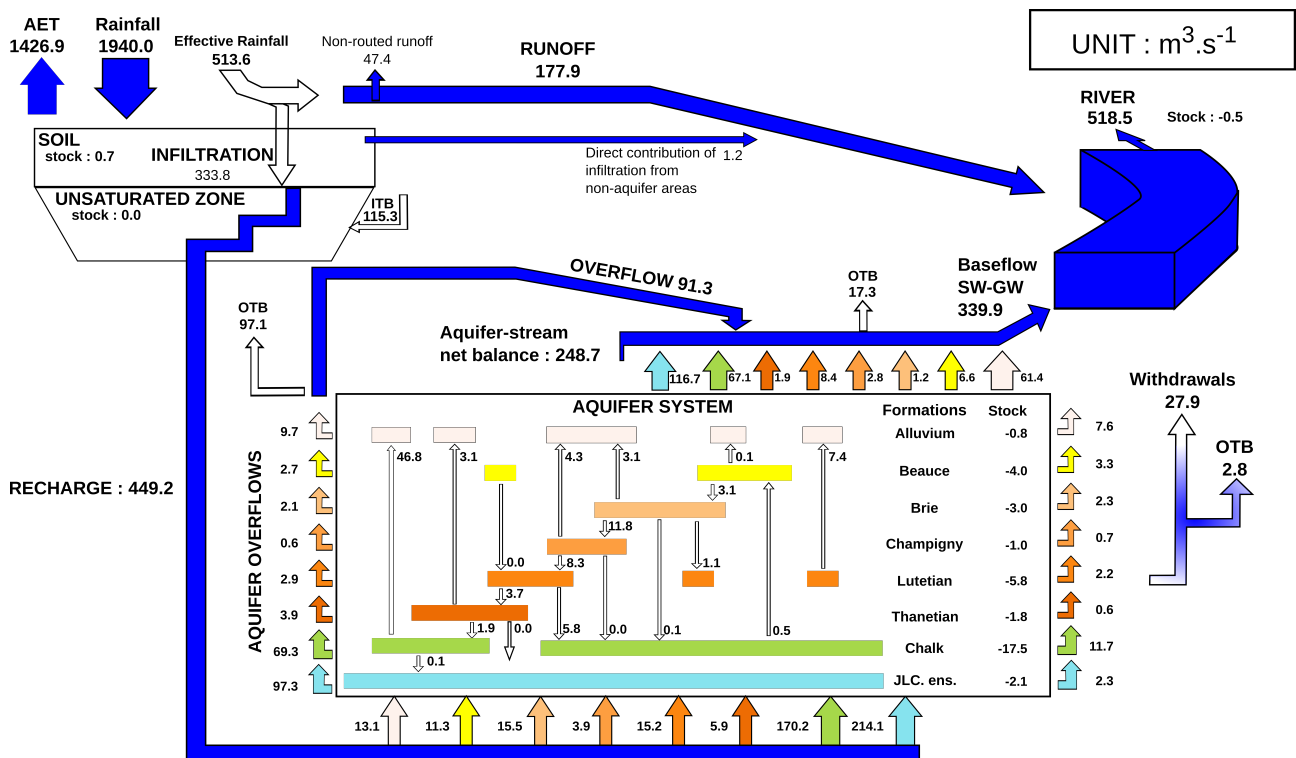


Figure 5. Bilan d'eau de l'hydrosystème de la Seine sur la période 2001-2018 tel que simulé par l'application ORCHIDEE-CaWaQS. Le système d'eau souterraine englobe toute l'étendue des aquifères. ITB : Flux d'infiltration pour les unités aquifères affleurantes au-delà des limites du bassin de la Seine. Les flux hors limites (ITB) sont au-delà de l'étendue du bassin de la Seine. Les flux sont exprimés en valeurs moyennes inter-annuelles en $m^3 \cdot s^{-1}$. Pluie = 760mm/an*, ETR* = 559mm/an*, Ruissellement = 69mm/an*, Recharge des aquifères = 132mm/an*. Couches aquifères : 'Alluvion' : Dépôts alluvionnaires, 'Beauce' : Ensemble des calcaires de Beauce, 'Brie' : Calcaires de Brie et sables de Fontainebleau, 'Champigny' : Calcaires de Champigny, 'Lutétien' : Calcaires du Lutétien, 'Thanétien' : Sables du Thanétien, 'Chalk' : aquifère crayeux du Crétacé supérieur, 'JLC. ens.' : Ensemble du Crétacé inférieur et du Jurassique.

% de la pluie effective. Un flux d'infiltration total de $449,2 m^3 \cdot s^{-1}$ transite par la zone non saturée, rechargeant l'ensemble du système aquifère.

27,8 % de la recharge de l'aquifère est perdue par des flux d'eau régionaux à travers les limites du bassin de la Seine (21,6 % de la recharge) ou retirée du système par des pompages (6,2 % de la recharge). Au sein du bassin de la Seine, les échanges fleuve-aquifère pour les ordres de Strahler supérieurs à 3 fournissent environ la moitié du débit ($248,7 m^3 \cdot s^{-1}$) enregistré à la sortie du réseau hydrographique (Figure 5). Ce que l'on appelle le débordement correspond principalement au drainage du système d'eau souterraine par les ordres de Strahler bas (un et deux). Il correspond donc également aux échanges nappe-rivière, et s'élève à $91,3 m^3 \cdot s^{-1}$ (17,6 % du débit total). Enfin, le ruissellement de surface contribue à hauteur de $177,9 m^3 \cdot s^{-1}$ (34,4 % du débit total).

4.2 Bilan thermique pluriannuel

Le bilan thermique pluriannuel sur la période 2001-2018 est illustré par la figure 6. La température moyenne pluriannuelle de l'air est de $10,6^\circ C$ dans le bassin de la Seine, et la température moyenne pluriannuelle de la surface du sol est de $11,3^\circ C$ (i.e. la température associée au ruissellement de surface). La température du sol à 2 m de profondeur est estimée à $10,7^\circ C$. La température moyenne quotidienne de la rivière est estimée à $12,1^\circ C$ (Figure 6). Les températures moyennes annuelles de l'aquifère varient entre $10,6^\circ C$ pour l'aquifère alluvial

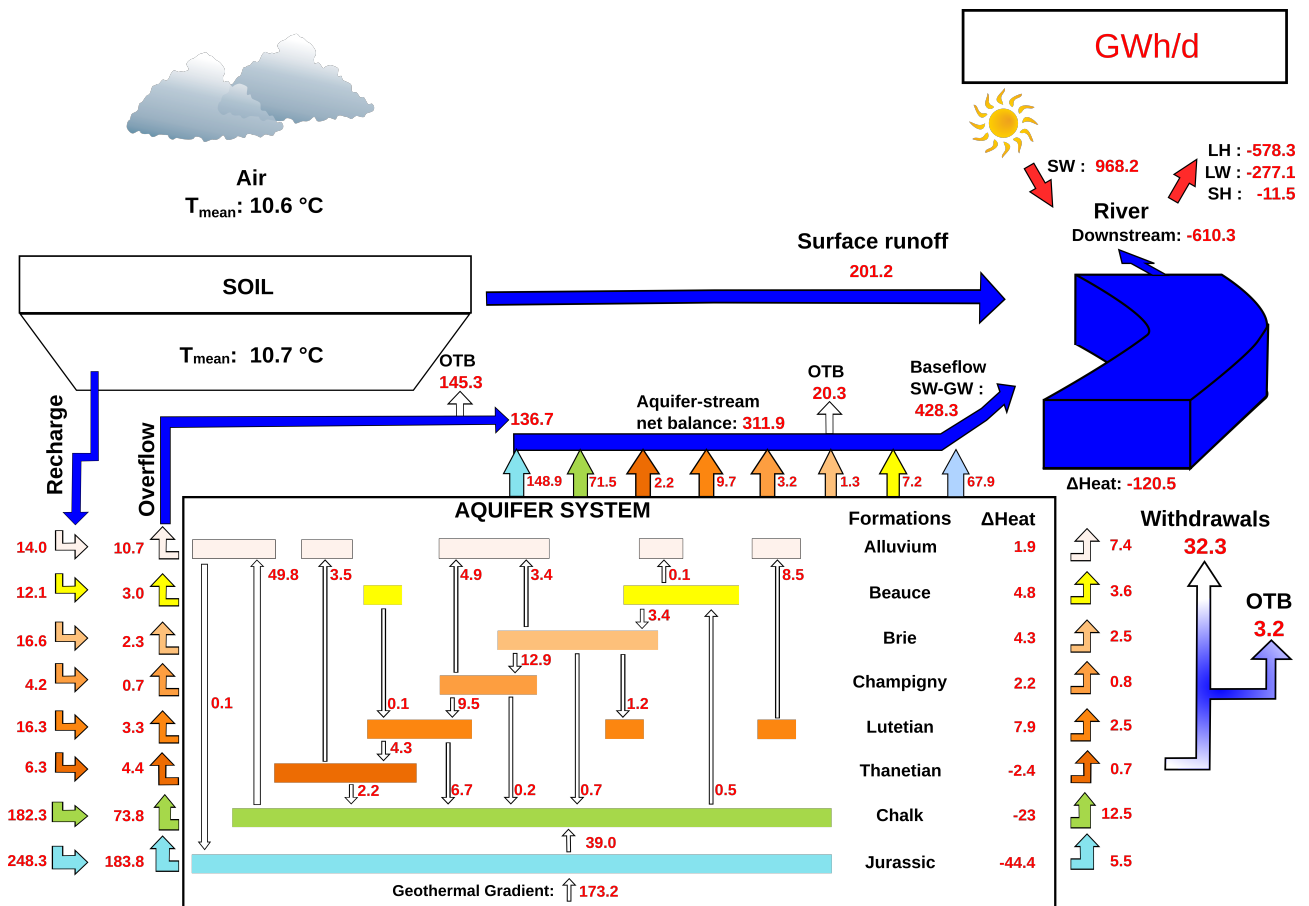


Figure 6. Bilan thermique de l'hydrosystème Seine sur la période 2001-2018 simulé par l'application ORCHIDEE-CaWaQS. Les quantités d'énergie sont exprimées en valeurs moyennes pluriannuelles en GW h par jour et la température moyenne annuelle quotidienne de l'air et du sol à 2 m de profondeur sont indiquées en °C. SW : Rayonnement net à courte longueur d'onde, LW : Rayonnements à grande longueur d'onde, SH : Chaleur sensible, LH : Chaleur latente. Couches aquifères : 'Alluvion' : Dépôts alluvionnaires, 'Beauce' : Ensemble des calcaires de Beauce, 'Brie' : Calcaires de Brie et sables de Fontainebleau, 'Champigny' : Calcaires de Champigny, 'Lutétien' : Calcaires du Lutétien, 'Thanétien' : Sables du Thanétien, 'Chalk' : aquifère crayeux du Crétacé supérieur, 'JLC. ens.' : Ensemble du Crétacé inférieur et du Jurassique.

peu profond et 23,8°C pour l'aquifère jurassique plus profond. Les gains de chaleur les plus importants dans le système aquifère sont dus aux flux de recharge (182,5 TW h) et au gradient géothermique (63,2 TW h) au fond du bassin (Figure 6). Le premier représente les flux d'advection tandis que le second représente les flux de conduction. Comme prévu, l'influence de l'advection diminue avec la profondeur, tandis que la conduction devient le processus thermique dominant. Ceci est dû à la diminution des flux d'eau avec la profondeur.

Les principales sources de pertes de chaleur par advection en surface sont dues à : (i) les échanges entre la rivière et l'aquifère (113,9 TW h), (ii) les échanges entre le cours d'eau et l'aquifère pour le réseau secondaire de la rivière (ordres 1 et 2 de Strahler) (c'est-à-dire le débordement, qui s'élève à 102,9 TW h), (iii) et les prélèvements (11,8 TW h). Le système aquifère perd le plus d'énergie via les aquifères du Jurassique, de la Craie et des alluvions. Le Jurassique perd les flux de chaleur advectifs les plus importants par le biais du débordement et des échanges entre la rivière et l'aquifère vers la surface (Figure 6). L'aquifère de la Craie et les alluvions sont les deuxième et troisième termes les plus importants au bilan de la rivière via le terme advectif. L'aquifère de la Craie est également le plus important en termes de pertes thermiques dues au prélèvement d'eau (4,6 TW h).

L'énergie provenant du rayonnement à courtes longueurs d'onde (rayonnement net, 353,4 TW h) est la principale

source non advective de gain de chaleur dans le réseau hydrographique chaque année (Figure 6), contribuant à 60 % de la charge thermique du fleuve pendant la période d'étude. Comme le montre la figure 5, les échanges nappe-rivière pour la rivière simulée (ordres de Strahler supérieurs à 3) et le trop-plein (ordres de Strahler 1 et 2) sont les plus grands termes au bilan thermique de la rivière. L'incidence du régime hydrologique sur le bilan thermique dans le réseau hydrographique est illustrée par l'important flux de chaleur advectif via le débit de base (156,3 TW h par an), qui constitue la deuxième source de gains de chaleur fluviale. Le ruissellement de surface représente 13% de la charge thermique totale du réseau hydrographique. Les pertes de chaleur non advectives les plus importantes dans le réseau hydrographique sont la chaleur latente et les pertes par rayonnement de grandes ondes, qui représentent respectivement 67% (211,0 TW h) et 32 % (101,1 TW h). Environ 1% des pertes de chaleur totales est dû aux pertes de chaleur sensible dans la rivière.

4.3 Flux thermique saisonnier dans la Seine à l'échelle du bassin

Les variations saisonnières de chaque terme du bilan thermique dans le réseau hydrographique sont fournies dans le Tableau 4 et la figure 7. Il est important de noter que les échanges thermiques entre la rivière et l'aquifère ne sont pas simulés par le modèle pour les rivières d'ordre de Strahler inférieur à 3. Cela implique que les flux ne sont pas calculés sur la même surface de rivière que les autres compartiments. Le rayonnement à courte longueur d'onde est plus élevé en été et au printemps. Il dépend du rayonnement solaire qui atteint la surface du cours d'eau, de l'albédo, de l'eau et du facteur d'ombrage. Le facteur d'ombrage peut varier en fonction de la morphologie du cours d'eau, de la végétation riparienne, de l'urbanisation ou des nuages (Loicq et al., 2018). Bien qu'un facteur d'ombrage fixe ait été utilisé dans cette étude (30%), des travaux supplémentaires sont nécessaires pour mettre en œuvre la variabilité spatiale du facteur d'ombrage.

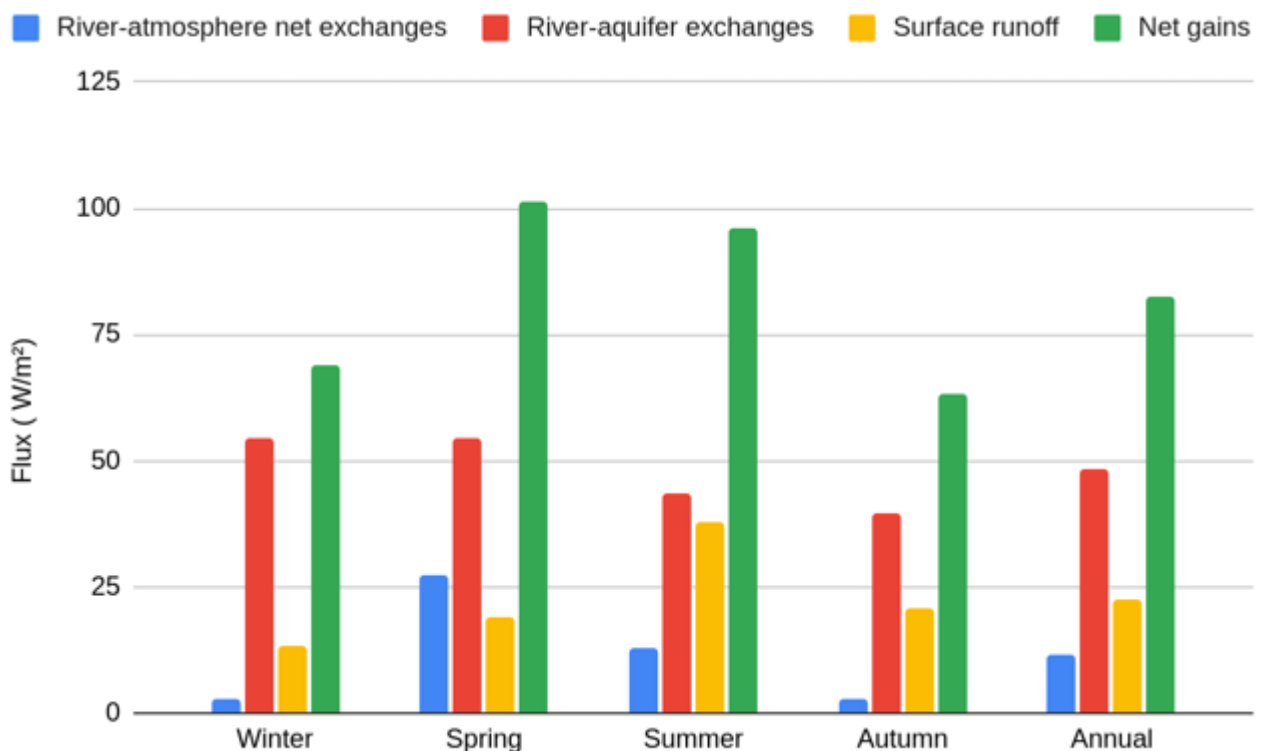


Figure 7. Flux de chaleur saisonniers (W m^{-2}) dans le réseau hydrographique de la Seine sur la période 2001-2018.

L'ordre de grandeur des flux non advectifs ne varie pas selon les saisons, la chaleur latente étant la plus grande

source de chaleur du système, suivie du rayonnement à grande longueur d’onde, de la chaleur sensible et de la conduction provenant du lit du cours d’eau. La chaleur latente entraîne en moyenne une perte de chaleur de $120,6 \text{ W m}^{-2}$ en été et de $20,3 \text{ W m}^{-2}$ en hiver. D’après la simulation, les flux de chaleur liés à la conduction dans le lit de la rivière sont négligeables par rapport aux autres termes de flux, quelle que soit la saison.

Tableau 4. Flux de chaleur saisonniers (W m^{-2}) dans le réseau hydrographique de la Seine sur la période 2001-2018. La longueur totale du fleuve est de 28378 km, la surface totale du réseau hydrographique d’ordre de Strahler supérieur à 3 est de 369 km^2 . Les flux nets sont le bilan thermique total du réseau hydrographique. Le signe négatif (-) indique une perte de chaleur par la rivière.

Processus	Type de flux	Hiver	Printemps	Été	Automne	Moyenne annuelle
Rayonnement à courtes longueurs d’onde	Conductif	39,3	142,0	180,1	75,9	109,3
Rayonnement à grande longueurs d’onde	Conductif	-16,1	-42,9	-44,6	-21,5	-31,3
Chaleur latente	Conductif	-20,3	-69,9	-120,6	-50,4	-65,3
Chaleur sensible	Conductif	-0,2	-1,7	-2,1	-1,1	-1,3
Échanges conductifs avec cours d’eau	Conductif	0,4	-0,2	-0,7	-0,1	0,2
Ruissellement de surface	Advectif	13,3	18,9	37,9	20,8	22,7
Echanges advectifs avec cours d’eau	Advectif	54,0	54,8	44,3	39,5	48,1
Flux nets	Total	69,1	101,5	96,2	63,2	82,5

Au cours de l’année, les gains de chaleur par la Seine sont liés au rayonnement à courte longueur d’onde et les échanges nappe-rivière. Pendant l’hiver, les gains nets de chaleur sont directement fonction du rayonnement à courte longueur d’onde qui représente 22 % des gains de chaleur pendant la période estivale (Tableau 4 et figure 7). Les échanges nappe-rivière soutiennent les gains de chaleur du réseau hydrographique tout au long des saisons, et deviennent la source de chaleur dominante en hiver. Les contributions des flux de chaleur advectifs de chaque unité aquifère changent chaque saison en raison des variations de température de la rivière et du volume d’eau échangé entre les nappes et la rivière. Les études partent généralement du principe que la contribution de la conduction du lit de la rivière est négligeable par rapport à l’apport de chaleur advective (Magnusson et al., 2012). Notre étude confirme cette affirmation puisque la conduction du lit de la rivière n’atteint que 1,5 % des flux advectifs nappe-rivière.

Loinaz et al. (2013) ont montré qu’à l’échelle du bassin versant, les échanges nappe-rivière contribuent à une fraction significative des apports de chaleur. De même, dans le bassin de la Seine, les échanges nappe-rivière contribuent significativement au bilan énergétique du fleuve. Localement, les échanges nappe-rivière peuvent dominer le bilan thermique, en particulier en hiver (Tableau 4). Ces échanges peuvent donner lieu à des effets locaux de réchauffement pendant l’hiver et de refroidissement pendant l’été et par conséquent créer des refuges thermiques pour les espèces aquatiques (Kaandorp et al., 2019).

Bien qu’une analyse de sensibilité détaillée n’ait pas été possible dans le cadre de cette première phase du projet, une étude similaire à l’échelle régionale dans le bassin de la Loire a rapporté que les facteurs dominants, par ordre décroissant d’importance, étaient le facteur d’ombrage, les températures des eaux d’amont, le débit des eaux souterraines, le débit des rivières et la géomorphologie de la rivière (Beaufort et al., 2016). Notre approche diffère de cette étude, qui reposait sur un concept de température d’équilibre, par la manière dont les processus sont traités explicitement et la température du lit des rivières est estimée par une solution analytique de manière distribuée. Nous avons constaté que l’échange rivière-atmosphère avait le plus grand impact sur le bilan thermique de la rivière à l’échelle régionale.

Conclusions et perspectives

La question des flux d'énergie au sein des hydrosystèmes a d'abord été portée à l'attention de la communauté scientifique par les sciences écologiques. Leur objectif était de comprendre comment la température de l'eau peut réguler le cycle de vie des communautés piscicole. Pour ce faire, de nombreuses études ont été menées sur des cours d'eau de tête de bassin, et des bilans thermiques ont été établis à partir de données *in situ* (Caissie, 2006; Webb et al., 2008). Par la suite, des outils numériques sont apparus pour calculer les flux d'énergie à l'échelle du bassin versant (Loinaz et al., 2013) et de bassin régional, comme la Loire (Beaufort, 2015; Beaufort et al., 2016; Loicq et al., 2018). L'un des principaux inconvénients de ces avancées significatives était la simplification de la simulation des eaux souterraines sans modélisation explicite de leurs processus.

Notre objectif est de quantifier le bilan énergétique à l'échelle régionale en incluant les processus des eaux souterraines et leur interaction avec les autres compartiments de l'hydrosystème grâce à la mise en place de la plateforme ORCHIDEE-CaWaQS selon les développements méthodologiques et techniques suivants :

- Développement des transferts de chaleur dans CaWaQS, notamment avec le couplage avec la librairie *libttc*, dédiée aux rivières et aquifères. Une approche originale pour le transfert dans les aquitards et le lit de la rivière a également été mise en œuvre sur la base de la solution analytique de Kurylyk et al. (2017) (voir annexe 4.4);
- Mise en place d'une application ORCHIDEE régionale;
- Développement d'une stratégie de calibration en deux étapes. Elle a été adaptée pour forcer ORCHIDEE à reproduire la part des principaux termes du bilan d'eau : l'ETR, le ruissellement et la recharge des aquifères, à l'échelle du bassin de la Seine et pour 14 sous-bassins principaux.

Une première simulation des flux d'eau et d'énergie à l'échelle régionale (96 204 km²) a été réalisée sur l'hydrosystème de la Seine afin de quantifier les interactions entre les différents compartiments de l'atmosphère jusqu'aux systèmes souterrains. La plateforme ORCHIDEE-CaWaQS simule le débit moyen des différents sous-bassins versants dans le bassin de la Seine et les niveaux piézométriques de manière correcte. Elle permet de simuler les bilans hydrique et énergétique de l'hydrosystème de manière adéquate, menant à une meilleure compréhension du rôle des eaux souterraines dans le fonctionnement du bassin.

Le bilan thermique du réseau hydrographique est contrôlé par principalement par les échanges avec l'air, et les échanges nappe-rivière et le ruissellement de surface dans le bassin de la Seine en fournissant respectivement 60%, 27% et 13% du bilan thermique total. Le principal apport d'énergie au réseau fluvial provient du rayonnement à courte longueur d'onde (356,4 TWh.y⁻¹, échange avec l'air). Ces résultats contribuent de manière significative à notre compréhension de la façon dont les échanges de chaleur entre les eaux souterraines contribuent au bilan thermique du réseau hydrographique.

La quantification des flux d'eau et d'énergie ouvre la voie à des études à l'échelle du bassin versant sur le fonctionnement de l'hydrosystème à diverses échelles temporelles et spatiales. Cet outil va permettre d'améliorer la quantification de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau et sur les flux d'énergie à l'échelle du bassin régional. Celle-ci fournira des informations utiles pour les stratégies d'adaptation et d'atténuation des impacts des changements globaux et répondre par conséquent au nexus "eau-énergie-alimentation" (De Amorim et al., 2018). Le Nexus "eau-énergie-alimentation" a émergé en 2011 pour permettre d'harmoniser les usages ces ressources nécessaire à nos sociétés et le maintien des écosystèmes. Il existe une compétition entre les usages de l'eau pour la production d'eau, de nourriture et d'énergie. De plus, ces trois éléments sont interdépendants. Par exemple, nous nécessitons de l'énergie pour pomper et acheminer l'eau potable et nous nécessitons de l'eau pour refroidir les centrales nucléaires. Notre modèle couplé ORCHIDEE-CaWaQS peut être mobilisé pour évaluer l'impact des politiques de gestion de l'eau, de l'énergie et des pratiques agricoles à l'échelle du bassin de manière quantitative et qualitative, en s'appuyant sur les études précédentes décrivant l'effet des pratiques agricoles sur l'hydro-agrosystème de la Seine (Beaudoin et al., 2018).

Annexes

4.4 Développement de la réactivité des interfaces nappe-rivière et des aquitards

Le transport de chaleur entre la rivière et l'aquifère ainsi que l'interface aquifère-aquitard-aquifère est assuré en utilisant la solution analytique de [Kurylyk et al. \(2017\)](#). Cette solution permet de simuler efficacement l'advection en utilisant des flux de drainance entre les aquifères ainsi que des flux d'échange d'eau entre la nappe et la rivière. De plus, les flux conductifs de chaleur sont calculés en utilisant les propriétés thermiques des différentes couches qui constituent ces interfaces, ce qui permet une précision accrue dans les simulation des flux échangés entre aquifères au sein des aquitards et à l'interface nappe-rivière. Elle est une amélioration de la solution de [Bredehoeft and Papaopulos \(1965\)](#), pour tenir compte des variations de la conductivité thermique avec la profondeur. L'équation est basée sur quatre hypothèses fondamentales similaires à celles mobilisées dans le module hydrogéologique : **(i)** le transfert de chaleur est calculé verticalement en une dimension et néglige les flux horizontaux ; **(ii)** le flux de Darcy est constant et uniforme dans toutes les couches ; **(iii)** les profils de température sont à l'état d'équilibre à chaque pas de temps ; et **(iv)** les propriétés sont homogènes dans chaque couche.

La solution analytique de [Kurylyk et al. \(2017\)](#) est la suivante :

$$T_i(z) = C_{i,1} \exp \frac{q * z * \rho_w * c_w}{\lambda_i} + C_{i2} \quad (i = 1, 2, \dots, n - 1) \quad (3)$$

où $T_i(z)$ est la distribution de la température dans la couche i [K], z est la profondeur de la couche la plus profondeur [m] (figure 8, n est le nombre de couches, λ_i est la conductivité thermique du milieu poreux de la couche i [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$], q est le flux Darcy [m s^{-1}] (positif vers le bas), supposé constant et uniforme dans toutes les couches, c_w est la capacité calorifique spécifique de l'eau [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$] et ρ_w est la masse volumique de l'eau [kg m^{-3}]. Les coefficients C_{i1} , C_{i2} et $C_{i+1,1}$ sont définis selon [Shan and Bodvarsson \(2004\)](#) :

$$C_{i2} = \frac{\alpha T_0 - T_B}{\alpha - 1} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$C_{1,1} = \frac{T_B - T_0}{\alpha - 1} \quad (i = 1, 2, \dots, n - 1) \quad (5)$$

$$C_{(i+1),1} = \exp \left(q * d_i \left(\frac{\rho_w c_w}{\lambda_i} - \frac{\rho_w c_w}{\lambda_{i+1}} \right) \right) * C_{i,1} \quad (i = 1, 2, \dots, n - 1) \quad (6)$$

Où d_i est l'épaisseur m de la couche i (voir figure 8). Le coefficient α est défini par la relation suivante :

$$\alpha = \exp \left(q \sum_{i=1}^n \left(\frac{b_i * \rho_w c_w}{\lambda_i} \right) \right) \quad (7)$$

T_0 est la température de la condition à la limite supérieure [K], T_B est la température de la condition à la limite inférieure [K] (voir figure 8) :

$$T_1(z = 0) = T_0 \quad (8a)$$

$$T_n(z = d_n) = T_B \quad (8b)$$

La solution analytique de Kurylyk est conceptualisée de deux façons dans le modèle (voir figure 8) :

1. l'interface aquifère-aquitard-aquifère

L'interface est un système à 3 couches avec 3 inconnues, à savoir les températures de l'aquitard ainsi que des aquifères supérieur et inférieur. T_0 est la température calculée dans l'aquifère supérieur et T_B est la température calculée au centre de l'aquifère inférieur.

2. l'interface nappe-rivière

L'interface est un système à 2 couches avec 3 inconnues, à savoir les températures de la rivière, du lit de la rivière et de l'aquifère. T_0 est la température calculée dans la rivière et T_B est la température calculée au centre de l'aquifère sous-jacent.

Les coefficients de la solution analytique sont incorporés comme un terme de la matrice de résolution du transfert de la chaleur dans le milieu poreux, résolvant ainsi simultanément le transport de chaleur dans l'aquitard. La température de la rivière au cours du pas de temps précédent est utilisée pour calculer la température du lit du cours d'eau à l'interface nappe-rivière.

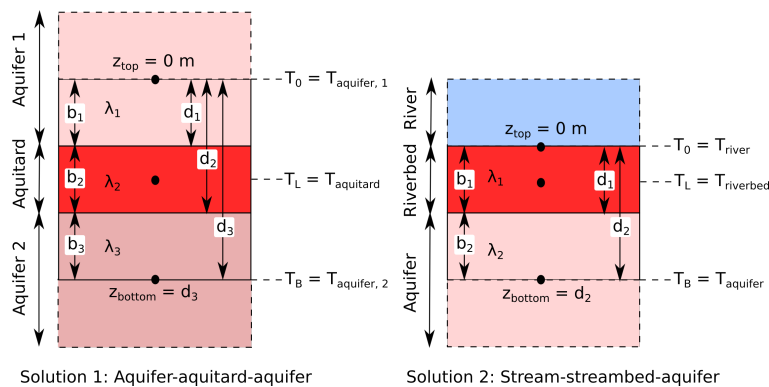


Figure 8. Conceptualisation de la solution analytique pour a) l'interface aquifère-aquitard-aquifère et b) l'interface nappe-rivière.

4.5 Performance de la plateforme ORCHIDEE-CaWaQS : Hydrologie

La simulation des eaux souterraines montre des performances globalement satisfaisantes puisque les *RMSE* et *MSE* sont inférieures à 4 m dans 40% et 44% des stations, respectivement. En ce qui concerne la dynamique de l'aquifère à l'échelle régionale, 67% des piézomètres présentent une corrélation (*CC*) supérieure à 0,5, tandis que 25% des piézomètres présentent un *KGE* supérieur à 0,5.

Dans la station de Vernon (bassin versant principal du bassin de la Seine), le biais a été estimé à 1,6 % avec 0,77 *KGE* et 0,82 *CC* ; la performance globale était satisfaisante (Figure 4.a). Si l'on considère les sous-bassins versants, 6 des 14 stations des sous-bassins versants principaux présentent un *KGE* supérieur à 0,7 et 8 stations présentent un *CC* supérieur à 0,7. Le biais estimé se situe entre -12,6 et 23,8%. À l'échelle du bassin, un total de 38,5 % des stations présentent des valeurs *KGE* (non indiquées) supérieures à 0,5.

Tableau 5. Critères statistiques (période 2001-2018) de 267 piézomètres répartis dans le bassin. Tableau supérieur : Erreur quadratique moyenne (RMSE), erreur absolue moyenne (MAE). Tableau inférieur : Coefficient de corrélation de Pearson (CC), et coefficient d'efficacité de Kling-Gupta (KGE).

Intervalle [m]	Nombre de piézomètres		Pourcentage cumulé [%]	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE
[0.0-2.0[	61	83	23	25
[2.0-4.0[	47	64	40	44
[4.0-6.0[	45	59	57	62
[6.0-8.0[	30	41	68	75
[8.0-10.0[	20	23	76	82
>=10	64	61	100	100
Intervalle [m]	Nombre de piézomètres		Pourcentage cumulé [%]	
	CC	KGE	CC	KGE
]0.7-1.0]	114	35	43	13
]0.5-0.7]	65	32	67	25
]0.4-0.5]	22	17	75	32
]0.2-0.4]	33	36	88	45
]0.0-0.2]	23	30	96	56
] -∞-0.0]	10	117	100	100

Références

- Anderson, M. P. (2005). Heat as a Ground Water Tracer. *Ground Water* 43, 951–968.
- Ballabio, C., P. Panagos, and L. Monatanarella (2016, January). Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. *Geoderma* 261, 110–123.
- Beaudoin, N., N. Gallois, P. Viennot, C. Le Bas, T. Puech, C. Schott, S. Buis, and B. Mary (2018). Evaluation of a spatialized agronomic model in predicting yield and n leaching at the scale of the seine-normandie basin. *Environmental Science and Pollution Research* 25(24), 23529–23558.
- Beaufort, A. (2015). *Modélisation physique de la température des cours d'eau à l'échelle régionale : application au bassin versant de la Loire*. Ph. D. thesis, Université François Rabelais de Tours.
- Beaufort, A., F. Curie, F. Moatar, A. Ducharne, E. Melin, and D. Thiery (2016). T-net, a dynamic model for simulating daily stream temperature at the regional scale based on a network topology. *Hydrological Processes* 30(13), 2196–2210.
- Boé, J., L. Terray, F. Habets, and E. Martin (2007). Statistical and dynamical downscaling of the seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology* 27(12), 1643–1655.
- Boucher, O., J. Servonnat, A. L. Albright, O. Aumont, Y. Balkanski, V. Bastrikov, S. Bekki, R. Bonnet, S. Bony, L. Bopp, et al. (2020). Presentation and evaluation of the ipsl-cm6a-lr climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 12(7), 1–52.
- Bredehoeft, J. D. and I. S. Papaopulos (1965). Rates of vertical groundwater movement estimated from the earth's thermal profile. *Water Resources Research* 1(2), 325–328.
- Caissie, D. (2006). The thermal regime of rivers : a review. *Freshwater Biology* 51(8), 1389–1406.

- Chandesris, A., N. Mengin, J. Malavoi, Y. Souchon, H. Pella, and J. Wasson (2008). Système relationnel d’audit de l’hydromorphologie des cours d’eau : principes et méthodes. Technical report.
- Cunge, J. (1969). Au sujet d’une méthode de calcul de propagation de crues (méthode muskingum). *J. Res. in Hydrology* 7(2), 205–230.
- De Amorim, W. S., I. B. Valduga, J. M. P. Ribeiro, V. G. Williamson, G. E. Krauser, M. K. Magtoto, J. B. S. O. de Andrade, et al. (2018). The nexus between water, energy, and food in the context of the global risks : An analysis of the interactions between food, water, and energy security. *Environmental Impact Assessment Review* 72, 1–11.
- de Marsily, G., E. Ledoux, A. Levassor, D. Poitral, and A. Salem (1978). Modelling of large multilayered theory and applications aquifer systems : Theory and Applications. *Journal of Hydrology* 36, 1–34.
- De Rosnay, P., M. Bruen, and J. Polcher (2000). Sensitivity of surface fluxes to the number of layers in the soil model used in gcms. *Geophysical research letters* 27(20), 3329–3332.
- Dentzer, J. (2016, July). *Forçages environnementaux et contrôles structuraux sur le régime thermique actuel du bassin de Paris : enjeux pour la compréhension du potentiel géothermique en Ile-de-France*. phdthesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- D’Orgeval, T., J. Polcher, and P. de Rosnay (2008). Sensitivity of the west african hydrological cycle in orchidee to infiltration processes. *Hydrology and Earth System Sciences* 12(6), 1387–1401.
- Ducharne, A. (2007). Importance of stream temperature to climate change impact on water quality. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 4(4), 2425–2460.
- Ducharne, A., P. Arboleda-Obando, and F. Cheruy (2020). Effets de l’humectation des sols par les nappes sur la trajectoire du changement climatique dans le bassin de la seine et en europe. Rapport d’étude, UMR 7619 METIS.
- Ducharne, A., F. Habets, M. Déqué, L. Evaux, A. Hachour, A. Lepaillier, T. Lepelletier, E. Martin, L. Oudin, C. Pagé, P. Ribstein, E. Sauquet, D. Thiéry, L. Terray, P. Viennot, J. Boé, M. Bourqui, O. Crespi, S. Gascoin, and J. Rieu (2009). Projet RExHySS : Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme. Rapport d’étude, Ministère de l’Ecologie, de l’Energie, du Développement durable et de la Mer.
- Ducharne, A., R. D. Koster, M. J. Suarez, M. Stieglitz, and P. Kumar (2000). A catchment-based approach to modeling land surface processes in a general circulation model : 2. parameter estimation and model demonstration. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 105(D20), 24823–24838.
- Eyring, V., S. Bony, G. Meehl, C. Senior, B. Stevens, R. Stouffer, and K. Taylor (2016). Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (cmip6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development* 9(5), 1937–1958.
- Flipo, N. (2005). *Modélisation intégrée des transferts d’azote dans les aquifères et les rivières : Application au bassin du Grand Morin*. Ph. D. thesis, Centre d’Informatique Géologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Flipo, N., N. Gallois, B. Labarthe, F. Baratelli, P. Viennot, J. Schuite, A. Rivière, R. Bonnet, and J. Boé (2020). *The Seine River Basin*, Volume 90 of *Handbook of Environmental Chemistry*, Chapter Pluri-annual water budget on the Seine basin : past, current and future trends, pp. 59–89. Cham, Switzerland : Springer.
- Flipo, N., N. Gallois, and J. Schuite (2023). Regional coupled surface–subsurface hydrological model fitting based on a spatially distributed minimalist reduction of frequency domain discharge data. *Geoscientific Model Development* 16(1), 353–381.

- Flipo, N., C. Monteil, M. Poulin, C. de Fouquet, and M. Krimissa (2012). Hybrid fitting of a hydrosystem model : long term insight into the Beauce aquifer functioning (France). *Water Resources Research* 48, W05509.
- Gallois, N. and N. Flipo (2021). Actualisation de l'application CaWaQS-Seine : Extension du système aquifère à la frange orientale du bassin et calibration de son comportement hydrodynamique. Rapport technique PIREN-Seine phase VIII, ARMINES/MINES ParisTech, PSL Université - Centre de Géosciences.
- Gallois, N. and P. Viennot (2018). Modélisation de la pollution diffuse d'origine agricole des grands aquifères du bassin seine-normandie : Actualisation des modélisations couplées stics-modcou – modélisation de scénarios agricoles sous changement climatique. Rapport technique d'étude, ARMINES/MINES ParisTech.
- Grant, F. (2007). Heterogeneity and thermal modeling of ground water. *Ground Water* 45, 485–490.
- Hemmerle, H., S. Hale, I. Dressel, S. A. Benz, G. Attard, P. Blum, and P. Bayer (2019). Estimation of groundwater temperatures in paris, france. *Geofluids* 2019.
- Hengl, T., J. M. d. Jesus, G. B. M. Heuvelink, M. R. Gonzalez, M. Kilibarda, A. Blagotić, W. Shangguan, M. N. Wright, X. Geng, B. Bauer-Marschallinger, M. A. Guevara, R. Vargas, R. A. MacMillan, N. H. Batjes, J. G. B. Leenaars, E. Ribeiro, I. Wheeler, S. Mantel, and B. Kempen (2017, February). SoilGrids250m : Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE* 12(2).
- Jolivet, C., L. Boulonne, and C. Ratié (2006). Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols. *Unité InfoSol, INRA, Orléans, France*. Accessed on 03.10.2021.
- Kaandorp, V. P., P. J. Doornenbal, H. Kooi, H. Peter Broers, and P. G. de Louw (2019, apr). Temperature buffering by groundwater in ecologically valuable lowland streams under current and future climate conditions. *Journal of Hydrology* 3, 100031.
- Kilic, D., A. Rivière, N. Flipo, A. Ducharne, J. Ghattas, N. Raoult, , P. Peylin, J. Demarty, B. Cappelaere, H. Barral, P. Ansart, A. Blanchouin, A. Baudin, L. Marlot, and P. Goblet (2019). Sensitivity analysis of surface water balance in orchidee : Case study on the avenelles basin. In *3e Journées de Modélisation des Surfaces Continentales*, pp. 1.
- Kilic, D., A. Rivière, N. Flipo, A. Ducharne, P. Peylin, and P. Goblet (2021). Integrated modeling of water and heat fluxes in the seine hydrosystem, france. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, pp. EGU21–4351.
- Kilic, D., A. Rivière, S. Wang, N. Gallois, and N. Flipo (2021). Développement du transport de chaleur au sein de la plateforme de modélisation des hydrosystèmes cawaqs.
- Krinner, G., N. Viovy, N. de Noblet-Ducoudré, J. Ogée, J. Polcher, P. Friedlingstein, P. Ciais, S. Sitch, and I. C. Prentice (2005). A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles* 19(1), 1–33.
- Kurylyk, B. L., D. J. Irvine, S. K. Carey, M. A. Briggs, D. D. Werkema, and M. Bonham (2017, jul). Heat as a groundwater tracer in shallow and deep heterogeneous media : Analytical solution, spreadsheet tool, and field applications. *Hydrological processes* 31(14), 2648–2661.
- Labarthe, B. (2016). *Quantification des échanges nappe-rivière au sein de l'hydrosystème Seine par modélisation multi-échelle*. Ph. D. thesis, MINES ParisTech, PSL Research University.
- Ledoux, E. (1980). *Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique*. Ph. D. thesis, ENSMP, UPMC.

- Loicq, P., F. Moatar, Y. Jullian, S. J. Dugdale, and D. M. Hannah (2018). Improving representation of riparian vegetation shading in a regional stream temperature model using lidar data. *Science of the total environment* 624, 480–490.
- Loinaz, M. C., H. Kampp Davidsen, M. Butts, and P. Bauer-Gottwein (2013). Integrated flow and temperature modeling at the catchment scale. *Journal of Hydrology* 495, 238–251.
- Lurton, T., Y. Balkanski, V. Bastrikov, S. Bekki, L. Bopp, P. Braconnot, P. Brockmann, P. Cadule, C. Contoux, A. Cozic, et al. (2020). Implementation of the cmip6 forcing data in the ipsl-cm6a-lr model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 12(4), e2019MS001940.
- Magnusson, J., T. Jonas, and J. W. Kirchner (2012). Temperature dynamics of a proglacial stream : Identifying dominant energy balance components and inferring spatially integrated hydraulic geometry. *Water Resources Research* 48(6).
- Maillot, M. (2019). *Étude des remontées de nappe de Paris et de la Petite Couronne lors des épisodes de crue de la Seine et de la Marne*. Ph. D. thesis, MINES ParisTech.
- Massei, N., B. Laignel, J. Deloffre, J. Mesquita, A. Motelay, R. Lafite, and A. Durand (2010). Long-term hydrological changes of the Seine River flow (France) and their relation to the North Atlantic Oscillation over the period 1950-2008. *Int. J. Climatol.* 30(14), 2146–2154.
- Maxwell, R. and S. Kollet (2008). Quantifying the effects of three-dimensional subsurface heterogeneity on hortonian runoff processes using a coupled numerical, stochastic approach. *Advances in Water Resources* 31, 807–817.
- Nash, J. E. (1959). Systematic determination of unit hydrograph parameters. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)* 64(1), 111–115.
- Peylin, P., C. Bacour, N. MacBean, S. Leonard, P. Rayner, S. Kuppel, E. Koffi, A. Kane, F. Maignan, F. Chevallier, et al. (2016). A new stepwise carbon cycle data assimilation system using multiple data streams to constrain the simulated land surface carbon cycle. *Geoscientific Model Development* 9(9), 3321–3346.
- Raoult, N., C. Ottlé, P. Peylin, V. Bastrikov, and P. Maugis (2021). Evaluating and optimizing surface soil moisture drydowns in the orchidee land surface model at in situ locations. *Journal of Hydrometeorology* 22(4), 1025–1043.
- Reynolds, C. A., T. J. Jackson, and W. J. Rawls (2000). Estimating soil water-holding capacities by linking the Food and Agriculture Organization Soil map of the world with global pedon databases and continuous pedotransfer functions. *Water Resources Research* 36(12), 3653–3662.
- Rivière, A. (2012). *Influences du pergélisol sur les écoulements souterrains et leurs échanges avec une rivière : étude numérique et expérimentale*. Ph. D. thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris. Accessed on 09/10/2021.
- Rivière, A., D. Ladet, W. Thomas, G. Le Breton, A. Ducharne, L. Oudin, and D. I. de France (2021). Projections des températures de l'eau de la seine à paris à l'horizon. *PIREN Seine*. Accessed on 21/02/2022.
- Sauer, V. B. and R. Meyer (1992). Determination of error in individual discharge measurements. Technical report, US Geological Survey ; Books and Open-File Reports Section [distributor]. Accessed on 04/03/2022.
- Shan, C. and G. Bodvarsson (2004). An analytical solution for estimating percolation rate by fitting temperature profiles in the vadose zone. *Journal of contaminant hydrology* 68(1-2), 83–95.
- Tafasca, S., A. Ducharne, and C. Valentin (2020, July). Weak sensitivity of the terrestrial water budget to global soil texture maps in the ORCHIDEE land surface model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1–20.

- Vidal, J.-P., E. Martin, L. Franchistéguy, M. Baillon, and J.-M. Soubeyrou (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology* 30(11), 1627–1644.
- Wang, F., F. Cheruy, and J.-L. Dufresne (2016). The improvement of soil thermodynamics and its effects on land surface meteorology in the ipsl climate model. *Geoscientific Model Development* 9(1), 363–381.
- Wang, T., C. Oettle, A. Boone, P. Ciais, E. Brun, S. Morin, G. Krinner, S. Piao, and S. Peng (2013). Evaluation of an improved intermediate complexity snow scheme in the orchidee land surface model. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 118(12), 6064–6079.
- Webb, B., D. Hannah, R. Moore, L. Brown, and F. Nobilis (2008). Recent advances in stream and river temperature research. *Hydrological Processes* 22, 902–918.
- Zhu, Z., J. Bi, Y. Pan, S. Ganguly, A. Anav, L. Xu, A. Samanta, S. Piao, R. R. Nemani, and R. B. Myneni (2013). Global data sets of vegetation leaf area index (lai) 3g and fraction of photosynthetically active radiation (fpar) 3g derived from global inventory modeling and mapping studies (gimms) normalized difference vegetation index (ndvi3g) for the period 1981 to 2011. *Remote sensing* 5(2), 927–948.

Bilan d'énergie de la Seine à la traversée de l'agglomération parisienne au regard des rejets ¹

Shuaitao Wang^{1*}, Nicolas Flipo², Aurélien Bordet², Michele Merchat³, Vincent Rocher⁴

¹ UMR 7619 METIS, Sorbonne Université, CNRS, EPHE, Paris

² Mines Paris, Université PSL, Centre de Géosciences, Fontainebleau

³ Fraicheur de Paris, Paris

⁴ Direction de l'innEAUvation, SIAAP

* shuaitao.wang@sorbonne-universite.fr

Résumé

Ce rapport présente les températures de l'eau simulées en Seine par PROSE-PA et les bilans d'énergie à la traversée de l'agglomération parisienne au regard des rejets anthropiques. Les équations décrivant les flux d'énergie à l'interface air-eau (librairie libseb) et le transport de chaleur (librairie libtcc) sont d'abord présentées. Ensuite, les rejets (débit et température) de Fraîcheur de Paris et les températures de l'eau associées aux rejets à la station d'épuration Seine aval sont estimés. Ces estimations permettent de diminuer les écarts entre simulation et observation aux périodes plus chaudes reportés dans une étude précédente. Les critères statistiques indiquent une très bonne performance de ProSe-PA pour simuler les températures de l'eau en Seine (RMSEs entre 0.51 °C et 0.85 °C, r (coefficient de corrélation) > 0.99, |Pbias| < 5% à la traversée de Paris). Enfin, un bilan d'énergie pluriannuel 2008-2012 et les bilans d'énergie saisonniers sont établis depuis l'amont de l'agglomération parisienne (Seine à Choisy-le-Roi, Marne à Neuilly-sur-Marne) jusqu'à l'estuaire de Poses. Les résultats montrent que l'atmosphère a tendance à légèrement refroidir les eaux de rivières (22 W m⁻²), notamment par l'évapo-condensation. En revanche, les échanges de chaleur à l'interface air-eau (de quelques W m⁻² à une centaine de W m⁻²) sont largement minoritaires face aux flux de chaleur transitant dans les rivières (de l'ordre de plusieurs milliers de W m⁻²) et aux flux d'énergie nets dus aux rejets et prélèvements anthropiques (546 W m⁻²).

Points clés

- Les flux d'énergie dus aux rejets et prélèvements anthropiques représentent cinq fois plus que les pertes par l'évapo-condensation
- L'atmosphère a tendance à légèrement refroidir les eaux de rivières par l'évapo-condensation
- Les températures de l'eau en Seine du 01/01/2008 au 31/12/2012 sont simulées par PROSE-PA

1. Pour citer cet article : Wang, S., Flipo, N., Bordet, A., Merchat, M., Rocher, V. Bilan d'énergie de la Seine à la traversée de l'agglomération parisienne au regard des rejets. Dans Rivière, A. (ed), *Transferts de chaleur et températures des eaux du bassin de la Seine*, PIREN-Seine, Rapport de synthèse phase VIII, Volume 4, 2023, pp. 71-95

Abstract

This report presents simulated water temperatures in the Seine river by PROSE-PA and energy balances through the urban area of Paris concerning anthropogenic discharges. The equations describing energy fluxes at the air-water interface (*libseb* library) and heat transport (*libttc* library) are first presented. Then, the discharges (flow and temperature) from the Fraîcheur de Paris cooling system and the water temperatures associated with the discharges at the Seine aval wastewater treatment plant are estimated. These estimations help reduce discrepancies between simulations and observations during warmer periods reported in a previous study. The statistical criteria indicate excellent performance of ProSe-PA in simulating water temperatures in the Seine river (Root Mean Square Errors between 0.51 °C and 0.85 °C, correlation coefficient (r) > 0.99, absolute Percentage Bias ($|Pbias|$) < 5% through Paris). Finally, a multi-year energy balance for 2008-2012 and seasonal energy balances are established from the upstream of the Paris urban area (Seine at Choisy-le-Roi, Marne at Neuilly-sur-Marne) to the Poses estuary. The results show that the atmosphere tends to slightly cool down river waters (22 W m^{-2}), mainly through evapo-condensation. On the other hand, heat exchanges at the air-water interface (ranging from a few W m^{-2} to about a hundred W m^{-2}) are significantly smaller compared to the heat fluxes passing through the rivers (on the order of several thousand W m^{-2}) and the net energy fluxes due to anthropogenic discharges and withdrawals (546 W m^{-2}).

Key points

- The energy fluxes due to anthropogenic discharges and withdrawals represent five times more than the losses through evapo-condensation
- The atmosphere tends to slightly cool down river waters through evapo-condensation
- The water temperatures in the Seine river from 01/01/2008 to 31/12/2012 are very well simulated by PROSE-PA

Table des matières

1	Implémentation du transport de chaleur dans le logiciel PROSE-PA	74
1.1	Bilan des échanges thermiques entre eau et atmosphère à l'aide de <i>libseb</i>	74
1.2	Transport de chaleur dans le réseau hydrographique à l'aide de <i>libttc</i>	76
2	Domaine d'étude et conditions aux limites	77
2.1	Domaine d'étude	77
2.2	Conditions aux limites : rivières, rejets anthropiques	77
2.3	Rappels des résultats issus des premières simulations	78
2.4	Estimation des rejets de Fraîcheur de Paris et de la station d'épuration Seine Aval	79

2.5	Synthèse des chroniques de forçage	81
3	Températures de l'eau simulées en Seine	82
3.1	Comparaison aux mesures de terrain	82
3.2	Variabilité nyctémérale de la température en Seine durant des canicules	86
3.3	Températures de l'eau simulées au long de la Seine	90
4	Bilan d'énergie à la traversée de l'agglomération parisienne	90
4.1	Erreur simulée du bilan d'énergie	90
4.2	Bilan d'énergie pluriannuel 2008-2012	91
4.3	Bilans d'énergie saisonniers	93

Introduction

S'il est maintenant extrêmement probable que le réchauffement climatique conduira dans la meilleure hypothèse à une augmentation de la température du globe d'au minimum 1.5°C à la fin du siècle, les conséquences d'un tel changement sur le fonctionnement des centres urbains largement dépendants des eaux de surface et de leur potentiel thermique sont incertaines et suscitent des interrogations de la part de plusieurs opérateurs, comme les fournisseurs de froid ou les producteurs d'énergie. En sus de ces interrogations sociétales se pose également la question de l'effet qu'aura ce réchauffement sur le fonctionnement biogéochimique des cours d'eau. Ces transformations sont en effet susceptibles d'engendrer de nouveaux *blooms* algaux, pénalisant les filières de potabilisation de l'eau, ou encore de remettre en cause l'ensemble des mesures visant à rétablir la continuité écologique en menaçant certaines espèces de poissons peu à même de supporter des températures élevées.

La température de l'eau constitue également l'un des facteurs de contrôle de la dégradation de la matière organique et de l'intensité de l'activité des communautés vivant dans les milieux aquatiques. Outre les activités des microorganismes, les activités humaines (rejets des stations d'épuration, refroidissement des réacteurs nucléaires, rafraîchissement urbain avec l'eau de la Seine) ont un impact sur le milieu récepteur à la traversée de l'agglomération parisienne.

Afin d'étudier ces différents enjeux, le transport de chaleur dans le réseau hydrographique a été développé dans le logiciel PROSE-PA en tenant compte du bilan d'énergie à la surface libre, *i.e.* à l'interface eau-air. Cela a nécessité deux actions majeures :

- la librairie *libseb* a été développée en C ANSI pour calculer le bilan d'énergie air-eau pour chaque maille de calcul de PROSE-PA
- la librairie *libttc* qui résout l'équation de transport (advection et dispersion) pour les espèces dissoutes a été adaptée aux spécificités des écoulements à surface libre en rivière au cours des travaux de thèse de Wang (2019). L'un des intérêts majeurs de *libttc*, pensé dès l'origine de la création de cette librairie, est que l'équation de transport est résolue dans sa forme réduite, ce qui permet d'étudier à la fois le transport de soluté et le transport de chaleur.

Un premier travail de modélisation des flux de chaleur en Seine (Wang et al., 2021) a montré que même si elles sont globalement très bien modélisées, les températures de l'eau en Seine étaient sous-estimées par PROSE-PA aux périodes plus chaudes. Afin de diminuer les écarts entre simulation et observation, on développe d'abord des méthodes pour estimer les rejets (débit et température) de Fraîcheur de Paris et ceux de la station d'épuration Seine aval. Ensuite, les températures de l'eau en Seine depuis l'amont de l'agglomération parisienne (Seine à Choisy-le-Roi et Marne à Neuilly-sur-Marne) jusqu'à l'estuaire de Poses sont simulées pour la période

2008-2012. Pour terminer, le bilan d'énergie pluriannuel 2008-2012 et les bilans saisonniers sont calculés au regard des rejets.

1 Implémentation du transport de chaleur dans le logiciel PROSE-PA

Le logiciel PROSE-PA est une version de PROSE (Even, 1995; Even et al., 1998, 2004; Flipo et al., 2004, 2007; Vilmin et al., 2015) couplant ce dernier à un filtre particulaire afin d'assimiler les concentrations en oxygène dissous observées dans le milieu récepteur (Wang et al., 2019; Wang, 2019). Au sein de PROSE-PA, trois bibliothèques principales servent à effectuer les calculs hydrauliques (*libhyd*), de transport (*libttc*) et biogéochimiques (*C-RIVE*). Afin de modéliser le bilan des échanges thermiques à l'interface air-eau, une nouvelle bibliothèque, *libseb* (*Surface Exchange Budget library*), a été créée et couplée dans PROSE-PA.

Pour définir le bilan thermique complet sur une section de cours d'eau, l'équation de conservation de l'énergie est requise, sous la forme suivante (transport de la température) (Sinokrot and Stefan, 1993) :

$$\frac{\partial(T_w)}{\partial t} = -U \frac{\partial(T_w)}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{H_{tot}}{\rho \cdot c_p \cdot d} \quad (1)$$

où T_w désigne la température de l'eau (K), U la vitesse moyenne de l'écoulement dans la section (m s^{-1}), D_L le coefficient de dispersion longitudinal ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), ρ la densité de l'eau (kg m^{-3}), c_p la capacité calorifique de l'eau ($\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$) et d la profondeur moyenne de la section (m). Le premier terme de la partie de droite représente le transport advectif et le second le transport diffusif. Quant au dernier terme de l'équation Eq. (1), comprenant H_{tot} , il correspond au flux énergétique total à l'interface air-eau, qu'il soit entrant ou sortant ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

1.1 Bilan des échanges thermiques entre eau et atmosphère à l'aide de *libseb*

La bibliothèque *libseb* établit, à partir des données météorologiques spatio-temporelles, un bilan global des échanges thermiques entre eau et atmosphère. C'est précisément ce flux (H_{tot}) que *libseb* calcule. Il se décompose en quatre termes :

$$H_{tot} = H_{sw} + H_{lw} + H_{lh} + H_{sh} \quad (2)$$

où H_{sw} (Boyd and Kasper, 2003) désigne le flux dû au rayonnement solaire (ondes courtes), H_{lw} (Benyahya et al., 2012) le flux dû aux rayonnement par ondes longues (atmosphère/environnement), H_{lh} (Dingman, 2008) le flux d'énergie par évapo-condensation (chaleur latente de transition de phase) et H_{sh} (Bowen, 1926) le flux de chaleur par convecto-conduction (chaleur sensible).

Les quatre flux du bilan d'énergie à l'interface air-eau sont détaillés ci-dessous.

1.1.1 Flux d'énergie dû au rayonnement par ondes courtes

$$H_{sw} = (1 - R_{sw}) \cdot H_{sun} \cdot vts \quad (3)$$

où R_{sw} est l'albédo moyen de l'eau (entre 5% et 10% en fonction de l'étude), H_{sun} le rayonnement solaire total (W m^{-2}), qui est une donnée SAFRAN, et vts inversement proportionnel à la couverture végétale locale (*view to sky* de 0% à 100% quand il n'y a aucune végétation).

1.1.2 Flux d'énergie net dû au rayonnement par ondes longues

$$H_{lw} = \underbrace{H_{atm} \cdot vts}_{\text{atmosphère}} + \underbrace{\varepsilon_v(1 - vts)\sigma \cdot T_a^4}_{\text{couv. végétale}} - \underbrace{\varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_w^4}_{\text{rivière}} \quad (4)$$

où H_{atm} est le rayonnement atmosphérique total (W m^{-2}), qui est une donnée SAFRAN, ε_v l'émissivité des végétaux, σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5.670367 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), T_a la température de l'air (K), ε_w l'émissivité de l'eau et T_w la température de l'eau (K).

1.1.3 Flux d'énergie par évapo-condensation

$$H_{lh} = \rho_w \cdot L_v \cdot \bar{E} \quad (5)$$

tel que \bar{E} le taux d'évaporation de l'eau de rivière prend la forme suivante :

$$\bar{E} = f_{wind} \cdot (e_a - e_w)$$

où f_{wind} est une fonction dépendant de la vitesse du vent u_{wind} (prenant souvent la forme : $f_{wind} = a \cdot u_{wind} + b$), e_a est la pression de vapeur dans l'air et e_w la pression de vapeur au ras de l'eau. ρ_w correspond à la masse volumique de l'eau liquide et L_v à la chaleur latente de transition de phase liquide/gaz.

Le taux d'évaporation de l'eau de rivière peut être calculé selon [Webb and Zhang \(1997\)](#) :

$$\bar{E} = 0.165(0.8 + u_{wind}/100) \cdot (e_a - e_w) \quad (6)$$

où \bar{E} est en mm d^{-1} . u_{wind} est la vitesse du vent à une hauteur de 2 mètres au-dessus de la surface de l'eau en km d^{-1} . e_a et e_w sont en mbar.

Dans la pratique, la vitesse du vent (u_{wind}) est souvent exprimée en m s^{-1} et la pression de vapeur de l'eau ou de l'air est calculée en kPa. On peut donc réécrire l'équation (6) :

$$\bar{E} = \left(0.132 + \frac{0.165 \cdot u_{wind} \cdot 86400}{100 \cdot 1000}\right) \cdot (e_a - e_w) \cdot 10 \quad (7)$$

$$= (0.132 + 0.14256 \cdot u_{wind}) \cdot (e_a - e_w) \cdot 10 \quad (8)$$

où \bar{E} est en mm d^{-1} , u_{wind} en m s^{-1} et e_a/e_w en kPa.

La masse volumique de l'eau liquide (ρ_w) est de 1000 kg m^{-3} . Si on considère que la chaleur latente de transition de phase liquide/gaz de l'eau est $2.47 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$, on peut déduire le flux d'énergie par évapo-condensation (H_{lh} , Eq. (5), W m^{-2}) :

$$H_{lh} = 1000 \cdot 2.47 \cdot 10^6 \cdot \bar{E} \quad (9)$$

$$= 1000 \cdot 2.47 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{86400 \cdot 1000} (0.132 + 0.14256 \cdot u_{wind}) \cdot (e_a - e_w) \cdot 10 \quad (10)$$

$$= 285.9 \cdot (0.132 + 0.143 \cdot u_{wind}) \cdot (e_a - e_w) \quad (11)$$

où u_{wind} est en m s^{-1} et e_a/e_w est en kPa.

On trouve ainsi l'équation (11) qui a été utilisée par [Leach and Moore \(2010\)](#); [Magnusson et al. \(2012\)](#). Cette équation est implémentée dans la librairie *libseb*. La pression de vapeur saturée ($e_{sat}(T)$, en kPa) est calculée

en fonction de la température de l'air ou de l'eau, T (en Kelvin), en suivant l'équation de Clausius-Clapeyron.

$$e_{sat}(T) = e_0 \times \exp \left[\frac{L_v}{R_v} \times \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (12)$$

où $e_0 = 0.611$ kPa et $T_0 = 273.15$ K sont constants, $L_v = 2.47 \cdot 10^6$ J kg⁻¹ est la chaleur latente de transition de phase liquide/gaz de l'eau and $R_v = 461$ J K⁻¹ kg⁻¹ est la constante des gaz pour la vapeur d'eau.

La pression de vapeur au ras de l'eau (e_w) a été supposée égale à $e_{sat}(T_w)$, tandis que la pression de vapeur de l'air (e_a) a été calculée comme suit,

$$e_a = \frac{RH}{100} \cdot e_{sat}(T_a) \quad (13)$$

où RH est l'humidité relative et T_a est la température de l'air.

1.1.4 Flux d'énergie par conducto-convection

$$H_{sh} = C_B \cdot \underbrace{\frac{P_a}{P_{ref}} \cdot \frac{T_w - T_a}{e_a - e_w}}_{\text{terme de Bowen}} \cdot H_{lh} \quad (14)$$

où C_B correspond à une constante empirique déterminée par [Bowen \(1926\)](#) (Pa K⁻¹), P_a à la pression moyenne de l'air au niveau de l'interface eau/air (Pa) et P_{ref} à la pression atmosphérique de référence (= 101325 Pa).

1.2 Transport de chaleur dans le réseau hydrographique à l'aide de *libttc*

Le transport de chaleur dans le réseau hydrographique est calculé par la librairie *libttc*. L'équation (1) est implémentée dans *libttc* en remplaçant la vitesse moyenne U par le débit Q ($= A \times U$), puisque l'équation (1) n'est valide que pour un champ de vitesses uniforme. A correspond à la surface mouillée au centre d'une section (m²). Par ailleurs, la profondeur moyenne d de la section sera approximée par le ratio $d = \frac{A}{W}$, où W est la largeur au miroir de la section. L'équation de transport de chaleur formulée en débit et tenant compte des flux d'énergie latéraux (f_x) s'écrit ainsi,

$$\frac{\partial(AT_w)}{\partial t} = -\frac{\partial(QT_w)}{\partial x} + AD_L \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{WH_{tot}}{\rho \cdot c_p} + f_x \quad (15)$$

1.2.1 Discrétisation numérique de l'équation de transport

On peut regrouper les flux latéraux (f_x) et les flux d'énergie à l'interface air-eau ($\frac{WH_{tot}}{\rho \cdot c_p}$) afin de faciliter l'écriture de la discrétisation numérique.

$$F_x = \frac{WH_{tot}}{\rho \cdot c_p} + f_x \quad (16)$$

La discrétisation se fait en temps et en espace de la même manière que pour les espèces dissoutes ([Wang, 2019](#)).

$$\begin{aligned} & \frac{A_i^n T_i^n - A_i^{n-1} T_i^{n-1}}{\Delta t} + \theta \frac{Q_{i+\frac{1}{2}}^n T_i^n - Q_{i-\frac{1}{2}}^n T_{i-1}^n}{\Delta x} + (1 - \theta) \frac{Q_{i+\frac{1}{2}}^{n-1} T_i^{n-1} - Q_{i-\frac{1}{2}}^{n-1} T_{i-1}^{n-1}}{\Delta x} \\ & = D_L (A_i^n \theta \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2} + A_i^{n-1} (1 - \theta) \frac{T_{i+1}^{n-1} - 2T_i^{n-1} + T_{i-1}^{n-1}}{\Delta x^2}) + \theta F_x^n + (1 - \theta) F_x^{n-1} \end{aligned} \quad (17)$$

$i + \frac{1}{2}$ et $i - \frac{1}{2}$ représentent les indices des faces d'une section i . Les débits et les surfaces mouillées sont calculés par la librairie *libhyd* avec les équations de Saint-Venant. Dans l'implémentation actuelle de la librairie *libttc*, le schéma implicite ($\theta = 1$) est utilisé.

2 Domaine d'étude et conditions aux limites

2.1 Domaine d'étude

Afin d'établir un bilan d'énergie et d'étudier les impacts des activités anthropiques, un modèle depuis l'amont de l'agglomération parisienne (Seine à Choisy-le-Roi, Point Kilométrique (PK) = 645.334 et Marne à Neuilly-sur-Marne, PK = 625.995) jusqu'à l'estuaire (Poses, PK = 862.000) a été construit (Fig. 1). Le domaine est discrétisé quasiment tous les 25 mètres. Au total, 11 029 mailles de calcul ont été créées.

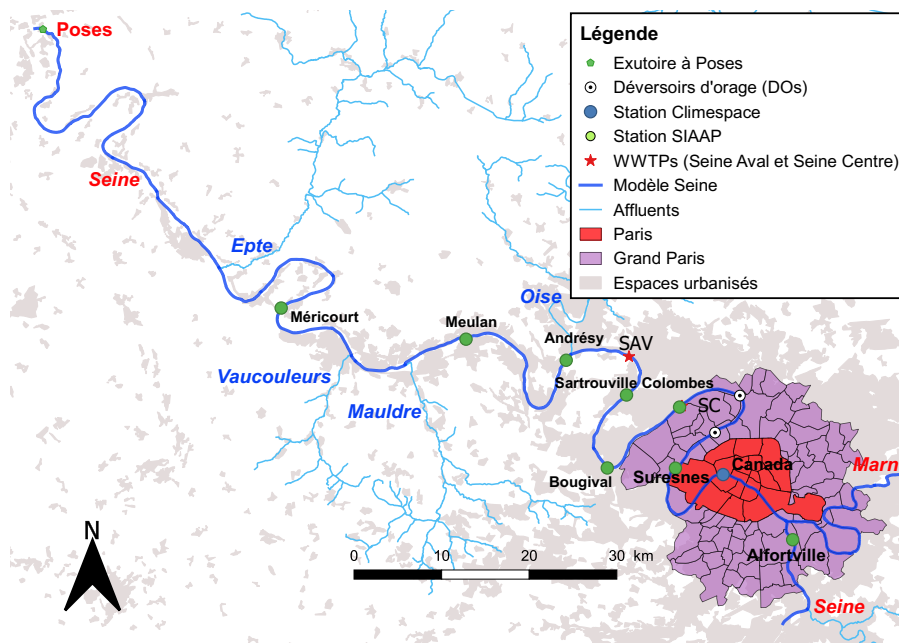


Figure 1. Domaine d'étude

2.2 Conditions aux limites : rivières, rejets anthropiques

Les débits et les températures journalières pour la Seine, la Marne et l'Oise sont renseignés grâce à des stations de mesure du Syndicat des eaux d'Île-de-France (SEDIF) (Fig. 2 et 3). Les températures associées aux rejets journaliers des stations d'épuration (par exemple, Seine aval, Seine centre, Seine amont, Marne amont etc.) à partir du 01/01/2008 sont fournies par le SIAAP. Les températures associées aux déversoirs d'orage sont considérées comme la température de l'eau brute (*bypass*) à la station d'épuration Seine aval (SAV). Les prélèvements par le SEDIF et EDP (Eau de Paris, Sagep) pour la production d'eau potable sont également renseignés.

Faute de données pour les conditions aux limites postérieures au 31/12/2012, la simulation est réalisée sur la période du 01/01/2008 au 31/12/2012. En revanche, les prélèvements et rejets par Fraîcheur de Paris ne sont pas disponibles sur cette période. Les températures associées aux rejets de la station d'épuration SAV sont estimées mais pas directement mesurées.

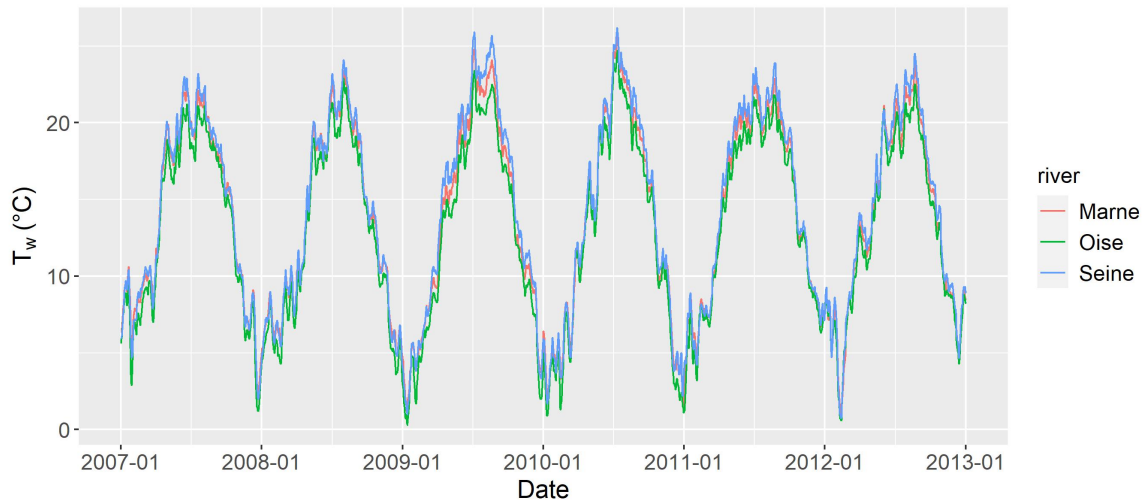


Figure 2. Températures de l'eau journalières pour les conditions aux limites en Seine (Choisy-le-Roi), Marne (Neuilly-sur-Marne), Oise (Méry-sur-Oise) et fournies par le SEDIF

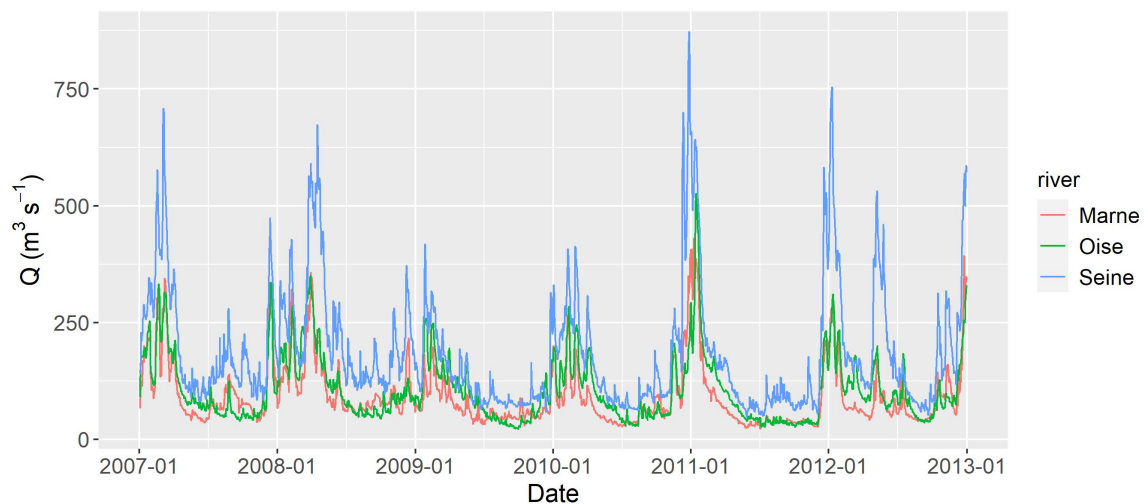


Figure 3. Débits journaliers pour les conditions aux limites en Seine (Choisy-le-Roi), Marne (Neuilly-sur-Marne), Oise (Méry-sur-Oise)

2.3 Rappels des résultats issus des premières simulations

L'équation de transport de chaleur implémentée dans PROSE-PA a été validée par une simulation en conditions contrôlées dans un premier temps (Wang et al., 2021). Dans un deuxième temps, les températures de l'eau en Seine simulées (avec les températures des rejets de SAV estimées, et sans prise en compte des rejets de Fraîcheur de Paris) ont été comparées aux observations (Wang et al., 2021). Les résultats montrent que les températures de l'eau sont globalement bien simulées par PROSE-PA. Cependant, les températures de l'eau sont sous-estimées aux périodes les plus chaudes et les écarts peuvent atteindre 2°C (Wang et al., 2021). Une piste d'amélioration est ainsi d'intégrer les rejets de Fraîcheur de Paris et d'ajuster les températures des rejets de SAV.

2.4 Estimation des rejets de Fraîcheur de Paris et de la station d'épuration Seine Aval

Afin d'améliorer les températures simulées aux périodes les plus chaudes, on développe des méthodes pour estimer les rejets de Fraîcheur de Paris (débit et température de l'eau) et ajuster les températures de l'eau rejetées à SAV.

2.4.1 Rejets de Fraîcheur de Paris : débit et température

Il existe trois points de prélèvement d'eau en Seine pour les pratiques de Fraîcheur de Paris : Bercy (PK = 656.02), Canada (PK = 661.62) et Tokyo (PK = 662.60). Les eaux prélevées servant à refroidir les bâtiments sont ensuite restituées/rejetées une dizaine de mètres à l'aval du point de prélèvement. Il n'y a donc pas de perte d'eau. Toutefois, les débits et les températures rejetés par Fraîcheur de Paris ne sont pas disponibles pour la période du 01/01/2008 au 31/12/2012, alors que les données de 2016 à 2020 sont disponibles.

Débits rejetés estimés par régression polynomiale multiple Afin de reconstituer les débits prélevés par Fraîcheur de Paris, on cherche une corrélation entre les débits prélevés (Q_{prel}) et les débits (Q_{aus}) et températures de l'air (T_a) mesurés à Paris Austerlitz.

Dans un premier temps, une régression linéaire multiple est testée ($\hat{Q}_{prel} = aQ_{aus} + bT_a + c$). Les prédictions (\hat{Q}_{prel}) ne sont toutefois pas satisfaisantes et les coefficients de corrélation sont inférieurs à 0.5. Ensuite, une régression polynomiale multiple (Eq.(19)) est appliquée à chaque point de prélèvement. Afin de respecter la loi de fonctionnement des pratiques de Fraîcheur de Paris (pp.79), on n'utilise que les débits prélevés associés à une température de l'eau inférieure à 25 °C pour la régression polynomiale multiple. Quand la température de l'eau est supérieure à 25 °C, le débit maximum prélevé ($Q_{prel,max}$) est considéré.

$$\hat{Q}_{prel} = \min(f(Q_{aus}, T_a), Q_{prel,max}) \quad (18)$$

$$f(Q_{aus}, T_a) = a_1Q_{aus} + a_2Q_{aus}^2 + a_3Q_{aus}^3 + a_4Q_{aus}^4 + b_1T_a + b_2T_a^2 + b_3T_a^3 + b_4T_a^4 + c \quad (19)$$

Les données sont découpées en deux parties : *training* (70%) et *test* (30%). Les RMSEs (*root mean square error*) et coefficients de corrélation sont calculés. Les résultats montrent que les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.6, meilleurs que ceux obtenus par la régression linéaire multiple (Fig. 4, Fig. 5 et Fig. 6).

Températures de l'eau estimées par loi de fonctionnement D'après Fraîcheur de Paris, les eaux rejetées sont généralement réchauffées de 5 °C, jusqu'à un maximum de 30 °C. On applique ainsi cette loi de fonctionnement pour reconstruire les températures de l'eau rejetées à l'aval des trois points de prélèvements (Bercy, Canada, Tokyo). Comme les données ne sont pas disponibles pour la période 2008-2012, on utilise les températures de l'eau simulées aux points de prélèvements (T_{prel}) dans l'équation (20). Un processus itératif est ainsi mis en place pour prendre en compte les influences des rejets sur les températures de l'eau prélevées à l'aval des rejets.

$$T_{rejet} = \min(30, T_{prel} + 5) \quad (20)$$

2.4.2 Ajustement des températures de l'eau rejetées par SAV

D'après les premières simulations incluant les rejets de Fraîcheur de Paris, ces derniers permettent de diminuer les écarts entre observations et simulations pour les stations proches des rejets (par exemple à Suresnes, Bougival et Colombes). En revanche, leur influence est faible pour les stations situées plus loin des rejets (Andrésy, Meulan et Méricourt). Il existe encore des écarts relativement importants pour ces stations aux périodes les plus chaudes.

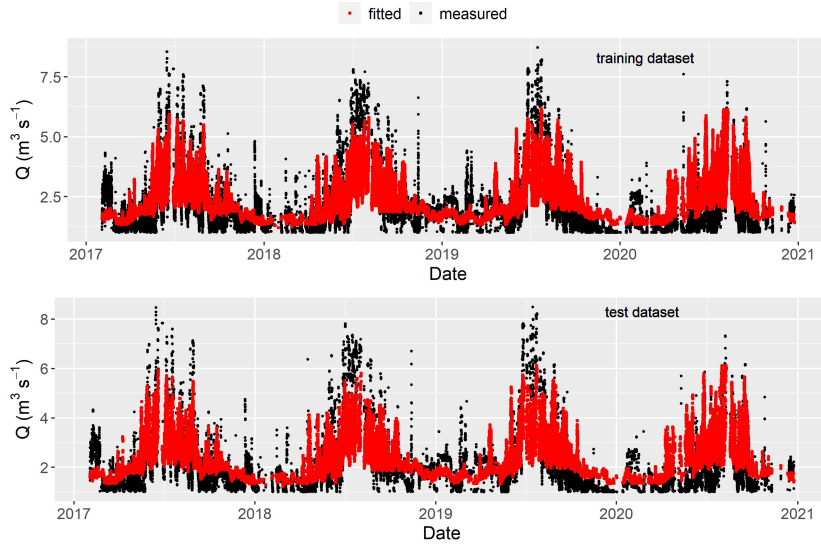


Figure 4. Estimation des débits rejetés par Fraîcheur de Paris à la station Bercy. Coefficient de corrélation : 0.65 (training) et 0.66 (test). RMSE (root mean square error) : $0.99 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (training) et $0.98 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (test)

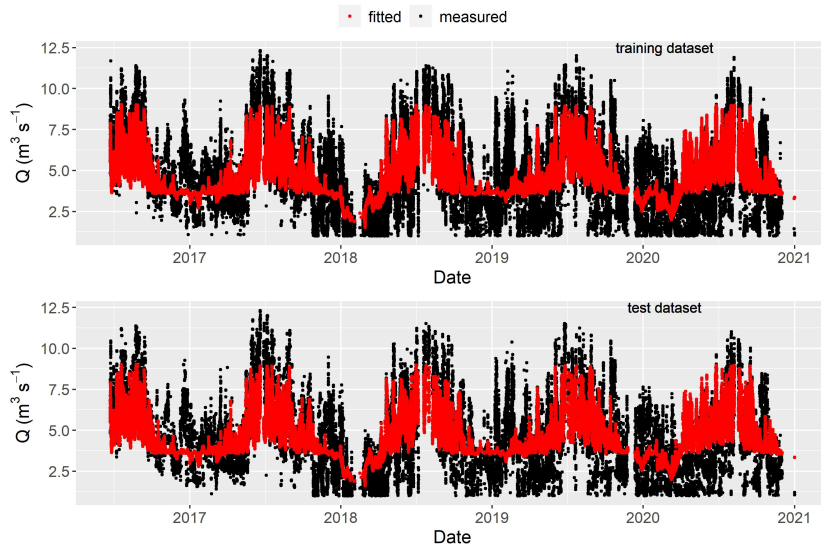


Figure 5. Estimation des débits rejetés par Fraîcheur de Paris à la station Canada. Coefficient de corrélation : 0.60 (training) et 0.59 (test). RMSE (root mean square error) : $1.78 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (training) et $1.78 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (test)

Les températures de l'eau rejetée par SAV ne sont pas mesurées en sortie du canal, mais en deuxième étage de biofiltration. Pour cela, les températures de l'eau sont estimées par le SIAAP ($T_{w,restim}$). On émet l'hypothèse que les températures de l'eau rejetée sont sous-estimées en été. C'est pourquoi le modèle sous-estime les températures de l'eau à l'aval de SAV aux périodes les plus chaudes.

Un ajustement simple est appliqué : quand la température de l'eau rejetée/estimée ($T_{w,restime}$) est inférieure à la température de l'air (T_a), on augmente la température de l'eau de 2°C (Eq. (21)).

$$T_{w,rajuste} = T_{w,restime} + 2 \quad \text{si} \quad T_a > T_{w,restime} \quad (21)$$

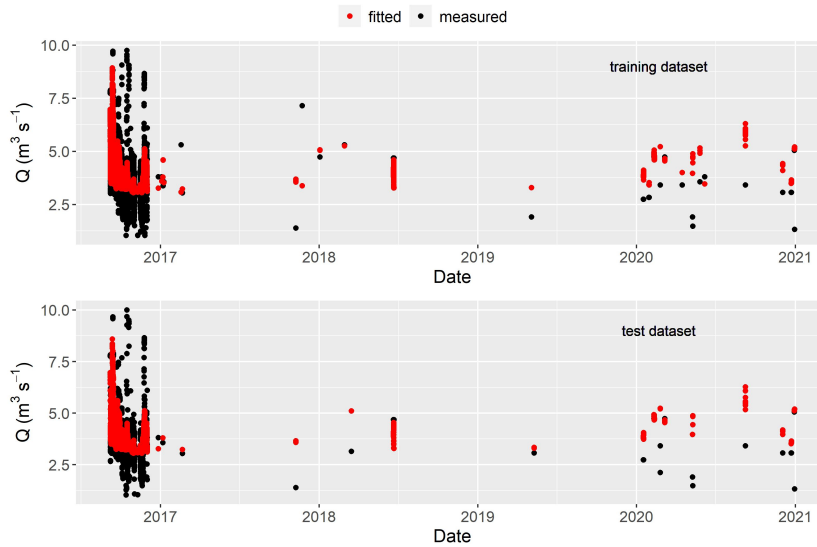


Figure 6. Estimation des débits rejetés par Fraîcheur de Paris à la station Tokyo. Coefficient de corrélation : 0.61 (training) et 0.61 (test). RMSE (root mean square error) : $0.98 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (training) et $0.96 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (test)

2.5 Synthèse des chroniques de forçage

Les moyennes des températures de l'eau, de l'air et des débits sont calculées pour les chroniques des forçages principaux (Tab. 1). Les températures de l'eau des rejets anthropiques sont supérieures à celles des eaux de la rivière alors que les débits sont moins importants par rapport aux débits de rivière. On peut observer également une diminution de la température de l'air de l'amont de Paris vers l'aval (Tab. 1).

Tableau 1. Synthèse des chroniques de forçage : Moyennes des températures de l'eau, de l'air et des débits

Sources	Seine	Marne	FP	GE	SC	SAV	Oise
$T_{w,moy}$ (°C)	14.07	13.62	18.89	17.66	20.68	19.60	12.82
$T_{a,moy}$ (°C)	12.45	12.45	12.17	12.17	11.72	11.72	11.56
Q_{moy} ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	183.66	90.24	25.34	1.45	2.60	18.58	104.74

$T_{w,moy}$: Température de l'eau moyenne ; $T_{a,moy}$: Température de l'air moyenne ;
 Q_{moy} : Débit moyen ; FP : Rejets Fraîcheur de Paris ; GE : Rejets à Garges Epinay ;
 SC : Station d'épuration Seine centre ; SAV : Station d'épuration Seine aval

3 Températures de l'eau simulées en Seine

Afin d'évaluer la simulation, trois critères statistiques sont calculés : RMSE (*root mean square error*), r (coefficient de corrélation) et Pbias (*Percent Bias*). Lors du calcul des critères statistiques, une interpolation linéaire est appliquée pour obtenir les températures simulées aux mêmes temps de mesure. Les températures de l'eau simulées aux huit stations du SIAAP, à une station de Fraîcheur de Paris (Canada) et à l'aval du domaine (Poses) sont présentées. Pour les deux stations Bercy et Tokyo de Fraîcheur de Paris, les températures de l'eau ne sont pas disponibles pour la période 2008-2012.

3.1 Comparaison aux mesures de terrain

3.1.1 Comparaison aux données du SIAAP

Les températures de l'eau sont mesurées toutes les 10 minutes aux stations de mesures, alors que les observations sont enregistrées toutes les heures. Les résultats montrent que les températures de l'eau sont très bien simulées par PROSE-PA à toutes les stations du SIAAP (Fig. 7 et 8). Un maximum de RMSE de 0.85 °C est simulé à la station Alfortville, mais reste relativement faible. Le Pbias à Alfortville est estimé à -3.7%, indiquant une sous-estimation en moyenne. Pour les autres stations, les RMSEs varient entre 0.5 °C et 0.7 °C et les Pbias entre -1.4% et 2.2% (Tab. 2). Même si les températures de l'eau rejetée par SAV sont ajustées en été, les températures de l'eau restent globalement sous-estimées aux stations aval (Andrésey, Meulan-en-Yvelines, Méricourt). Tous les coefficients de corrélation (r), sauf celui à Sartrouville (0.9847), sont supérieurs à 0.99, ce qui indique une bonne corrélation entre simulations et observations.

Tableau 2. RMSE, r et Pbias calculés aux stations du SIAAP

Stations	Alfortville	Suresnes	Colombes	Bougival	Sartrouville	Andrésey	Meulan	Méricourt
PK	649.97	675.45	695.41	707.4	716.63	730.93	752.69	779.80
RMSE (°C)	0.85	0.51	0.56	0.52	0.68	0.55	0.62	0.64
r (-)	0.9946	0.9983	0.9901	0.9975	0.9847	0.9963	0.9873	0.9967
Pbias (%)	-3.7	2.2	0.0	1.3	-1.9	-1.2	-1.4	-0.8

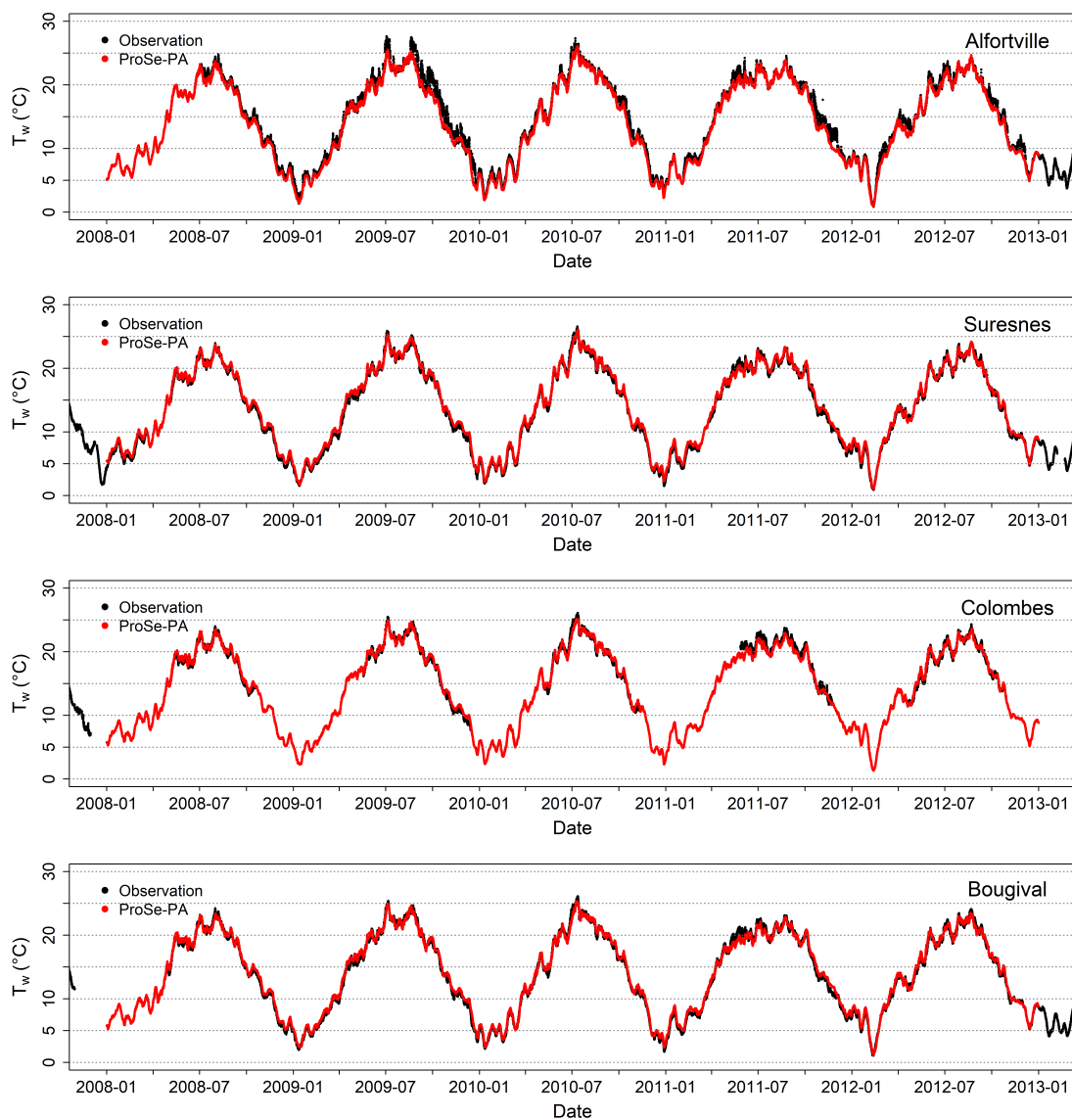


Figure 7. *Températures simulées aux quatre stations de surveillance du SIAAP : Alfortville, Suresnes, Colombes, Bougival*

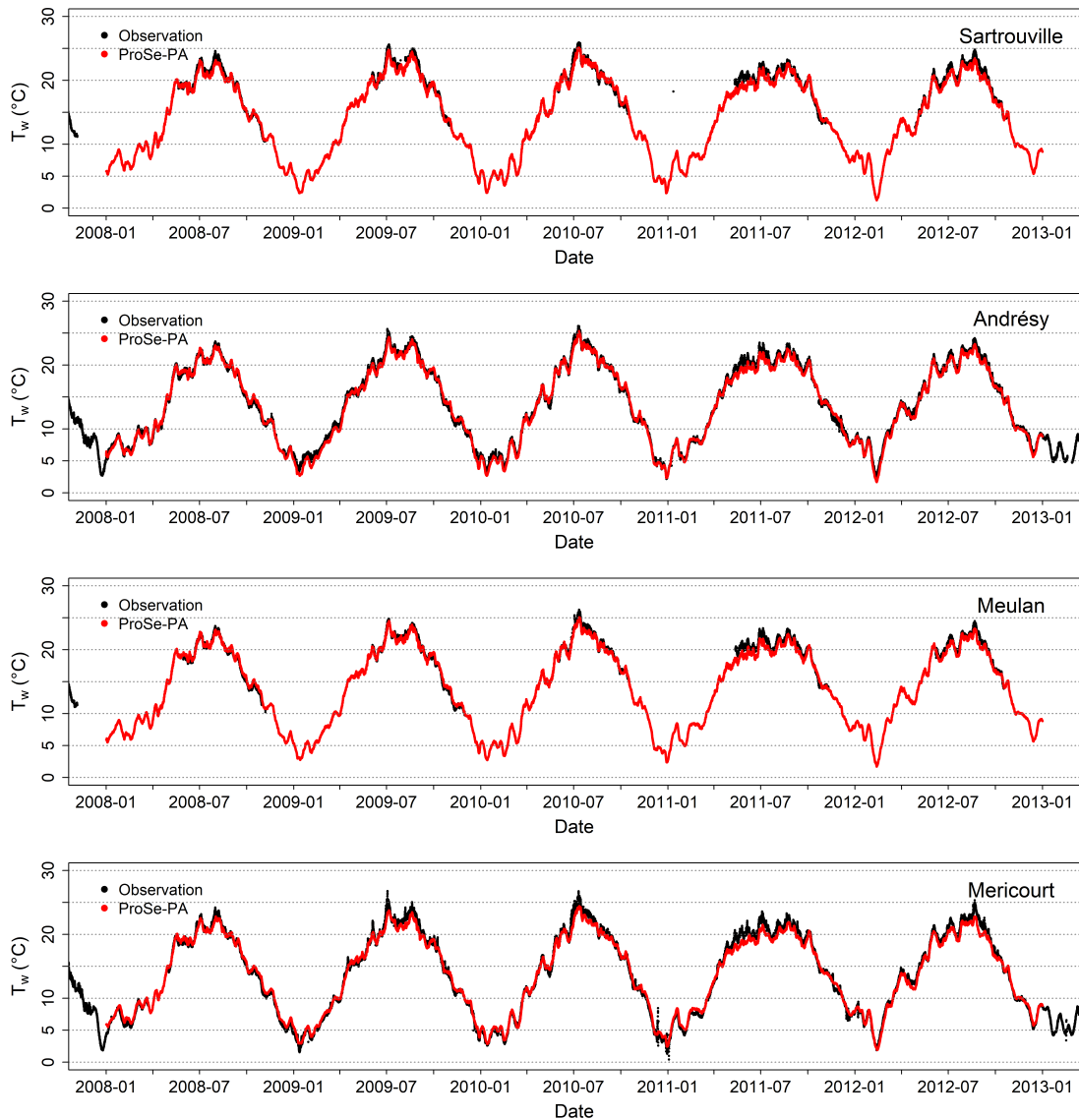


Figure 8. Températures simulées aux quatre stations de surveillance du SIAAP : Sartrouville, Andrésy, Meulan, Méricourt

3.1.2 Comparaison aux données de Fraîcheur de Paris

Pour les données de Fraîcheur de Paris, on observe que les températures de l'eau mesurées à la station Canada ne sont pas représentatives pour certaines périodes (par exemple, du 15/01/2008 au 03/02/2008, températures constantes de 7.62 °C entre janvier 2010 et septembre 2012, Fig. 9). Ces valeurs aberrantes ont été éliminées lors du calcul des trois critères statistiques (RMSE, r , Pbias).

Les températures de l'eau à la station de mesure Canada sont également très bien simulées (Fig. 9). La RMSE et Pbias restent très faibles avec des valeurs de 0.58 °C et 0.3%, respectivement. Le coefficient de corrélation (r) est estimé à 0.9962.

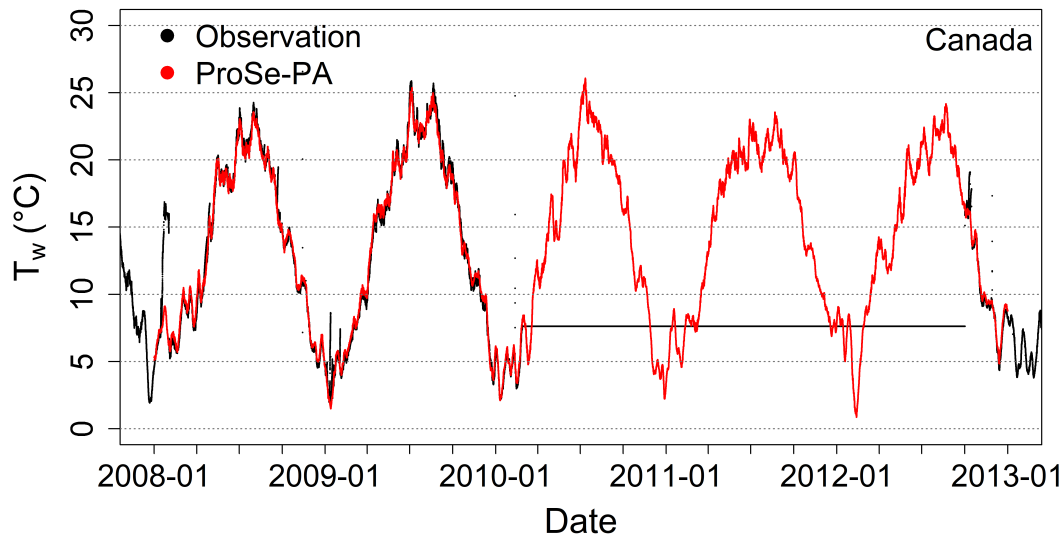


Figure 9. Températures simulées (toutes les 10 minutes) et observées (toutes les 10 minutes) à la station de surveillance Canada de Fraîcheur de Paris. RMSE : 0.58 °C ; r : 0.9962 ; Pbias : 0.3%

3.1.3 Comparaison à l'aval du domaine à Poses

Les moyennes journalières des températures simulées sont calculées afin de les comparer aux mesures journalières à l'aval du domaine à Poses fournies par le RNT (Réseau National de suivi des Températures). Une RMSE de 1.11 °C est obtenue pour la période simulée, ce qui est relativement plus important que les écarts estimés aux stations du SIAAP et de Fraîcheur de Paris. Elle est notamment liée aux sous-estimations des températures de l'eau en été qui sont cohérentes avec un Pbias de -4% (Fig. 10). Néanmoins, les simulations et les observations sont très bien corrélées, avec un coefficient de corrélation de 0.9950.

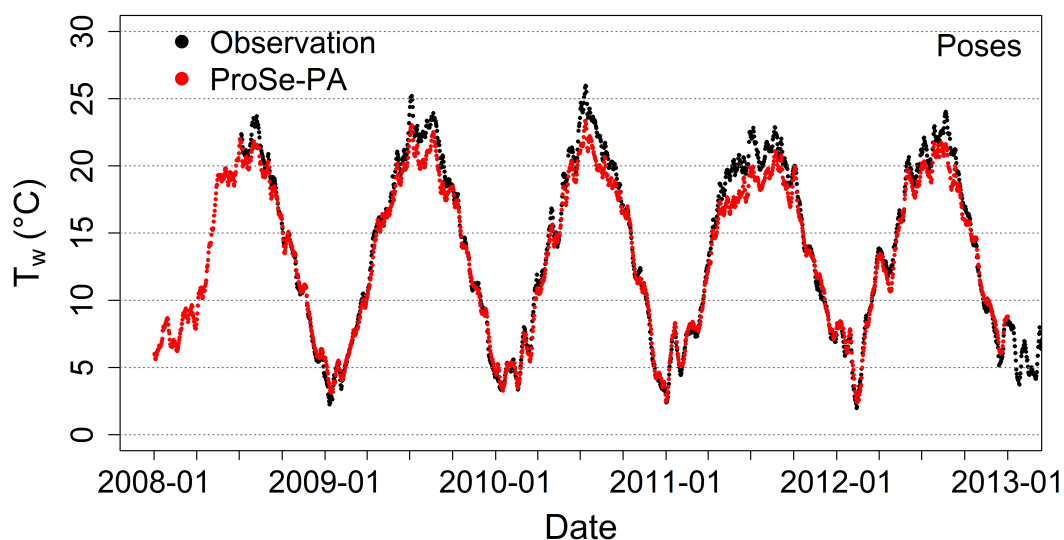


Figure 10. Moyennes journalières des températures simulées et observées à l'aval du domaine à Poses. RMSE : 1.11 °C ; r : 0.9950 ; Pbias : -4.2%

3.2 Variabilité nycthémerale de la température en Seine durant des canicules

D'après les mesures de la température de l'eau en Seine, on observe que l'année 2009 et l'année 2010 sont les deux années les plus chaudes sur la période d'étude au regard de la température de l'eau maximale (en juillet et août). Les chroniques de température de l'eau des mois de juillet et d'août de 2009 et 2010 sont présentées ici (Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13 et Fig. 14).

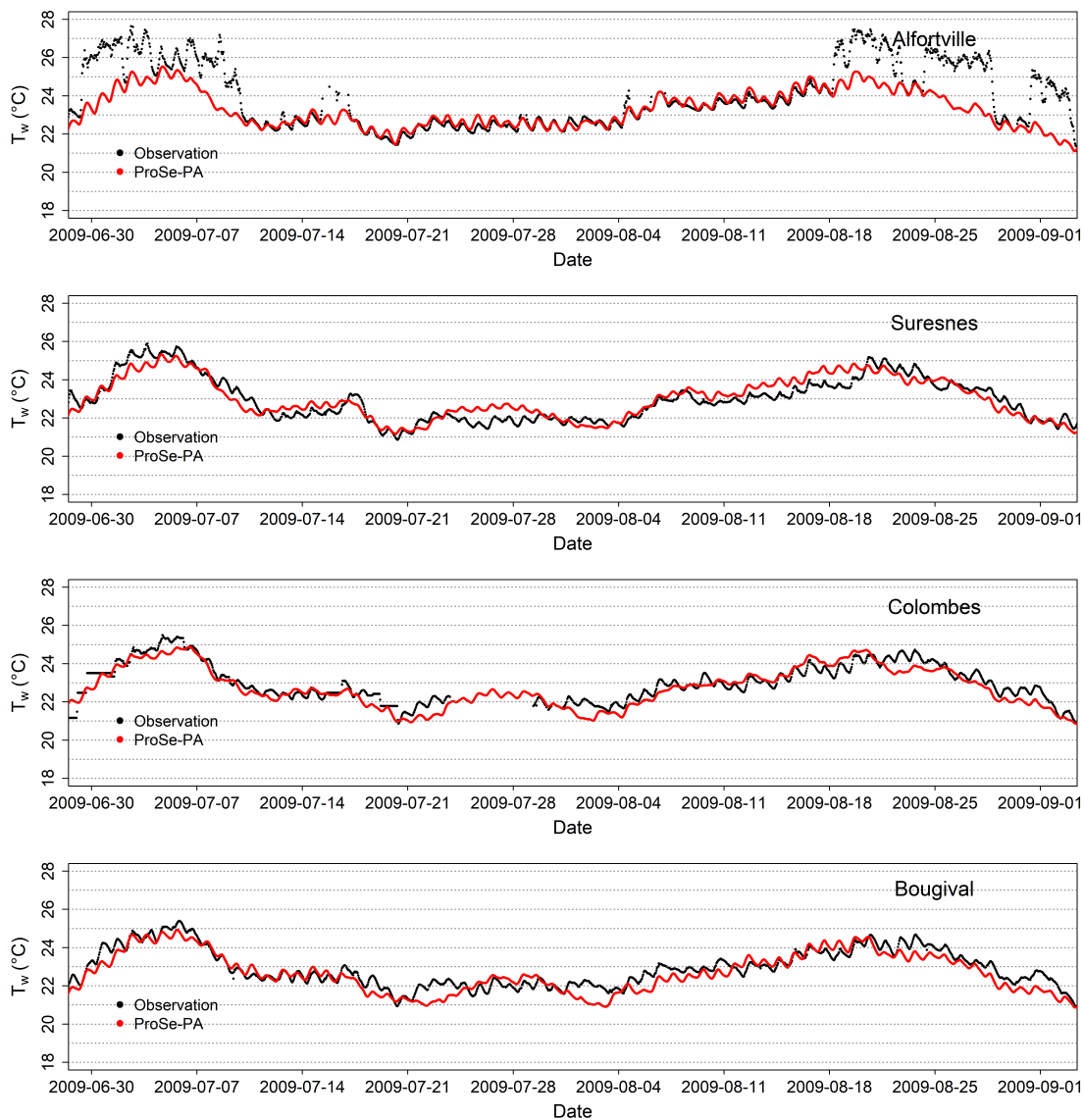


Figure 11. Températures simulées aux quatre stations amont de surveillance du SIAAP durant des canicules en 2009

On observe tout d'abord qu'il existe des anomalies des mesures de température de l'eau à Alfortville. Les températures mesurées début juillet et fin août montrent plus de variabilité, alors que les simulations se superposent bien avec les observations entre mi-juillet et mi-août (Fig. 11). Ensuite, malgré des écarts entre simulations et observations, elles sont très bien corrélées. Enfin, on peut observer que les variations nycthémerales des températures de l'eau durant les étés 2009 et 2010 sont au maximum de 1 °C, sauf à Méricourt où la variabilité peut atteindre 3 °C début juillet 2009.

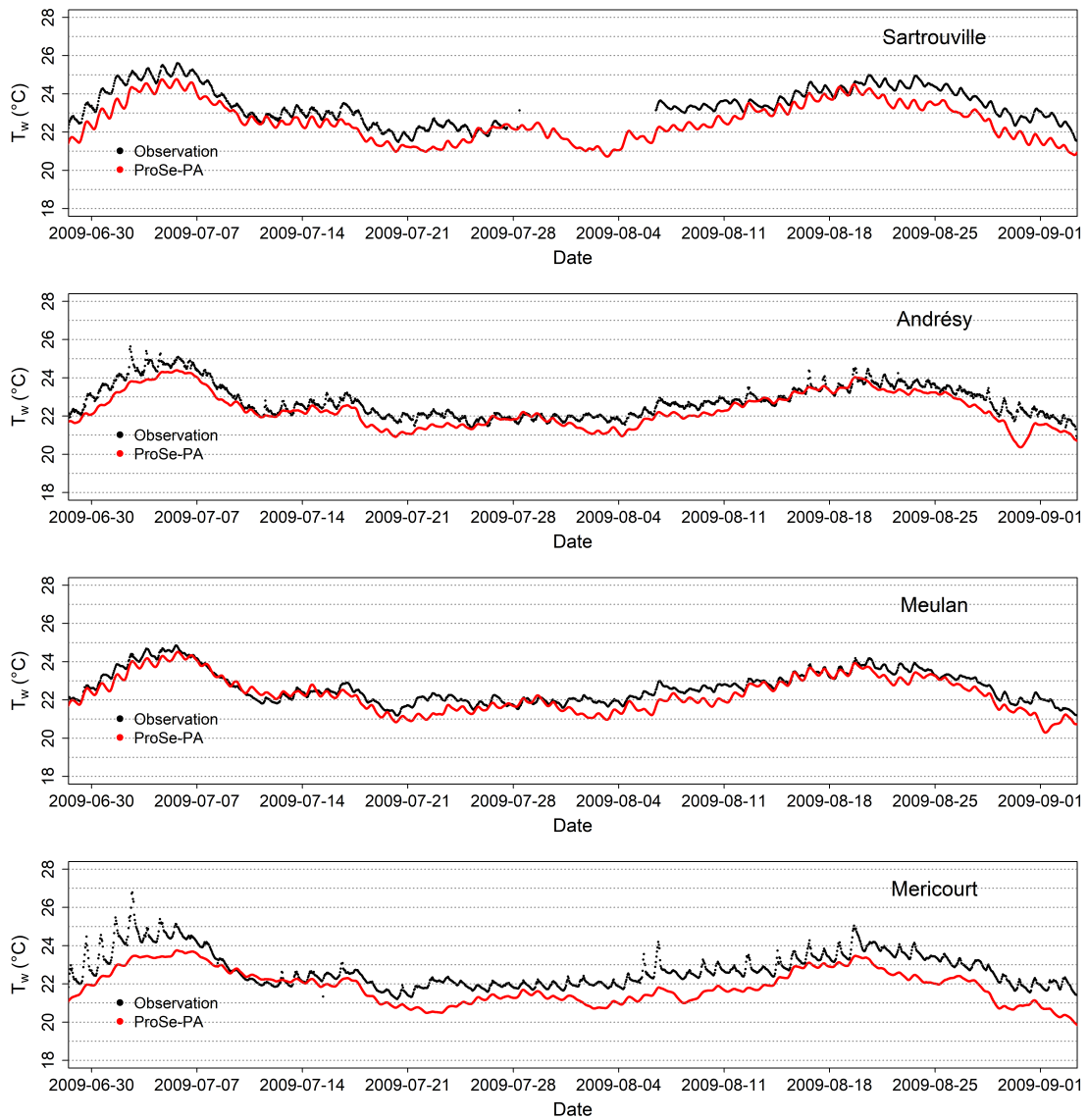


Figure 12. Températures simulées aux quatre stations aval de surveillance du SIAAP durant des canicules en 2009

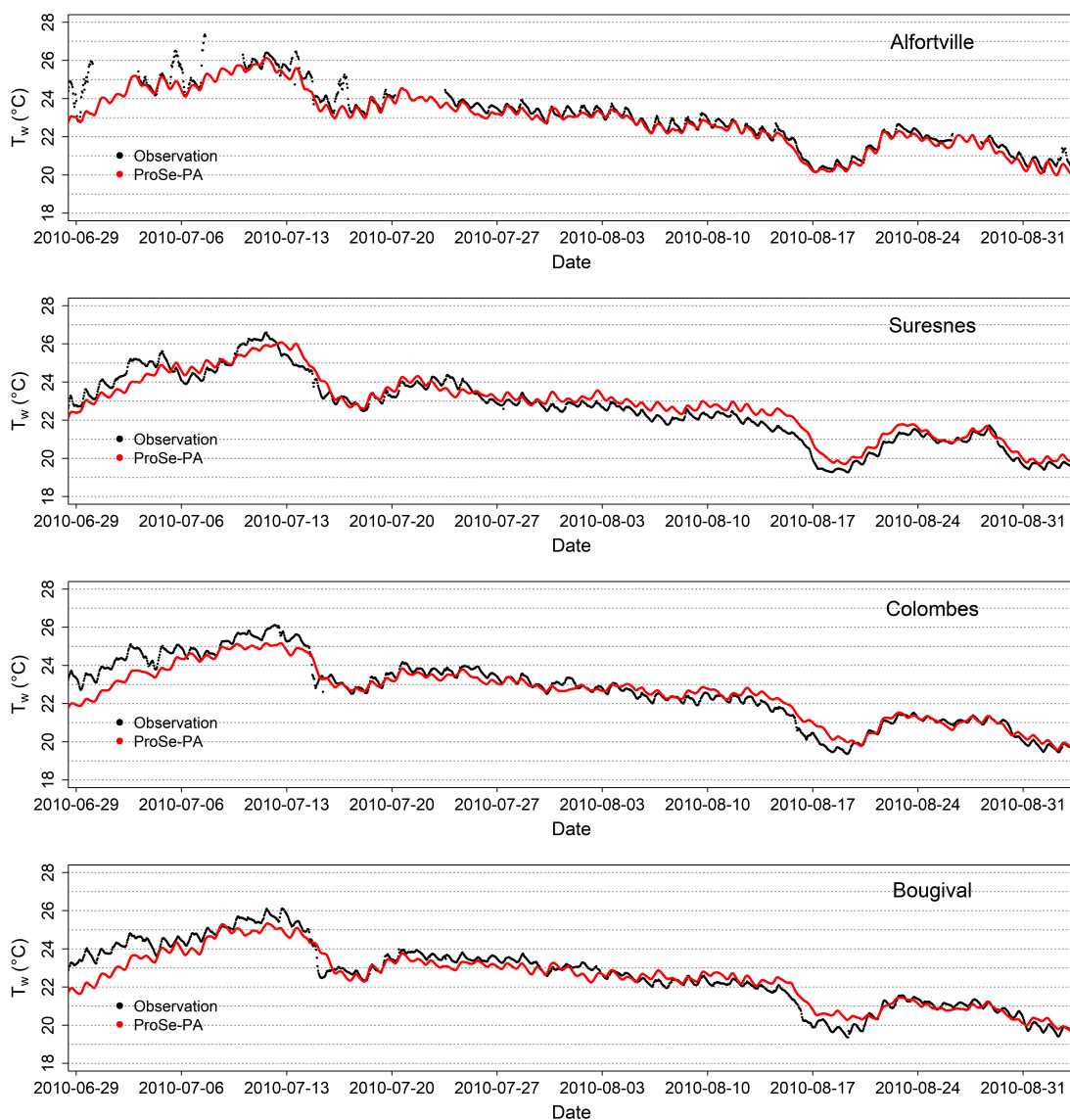


Figure 13. Températures simulées aux quatre stations amont de surveillance du SIAAP durant des canicules en 2010

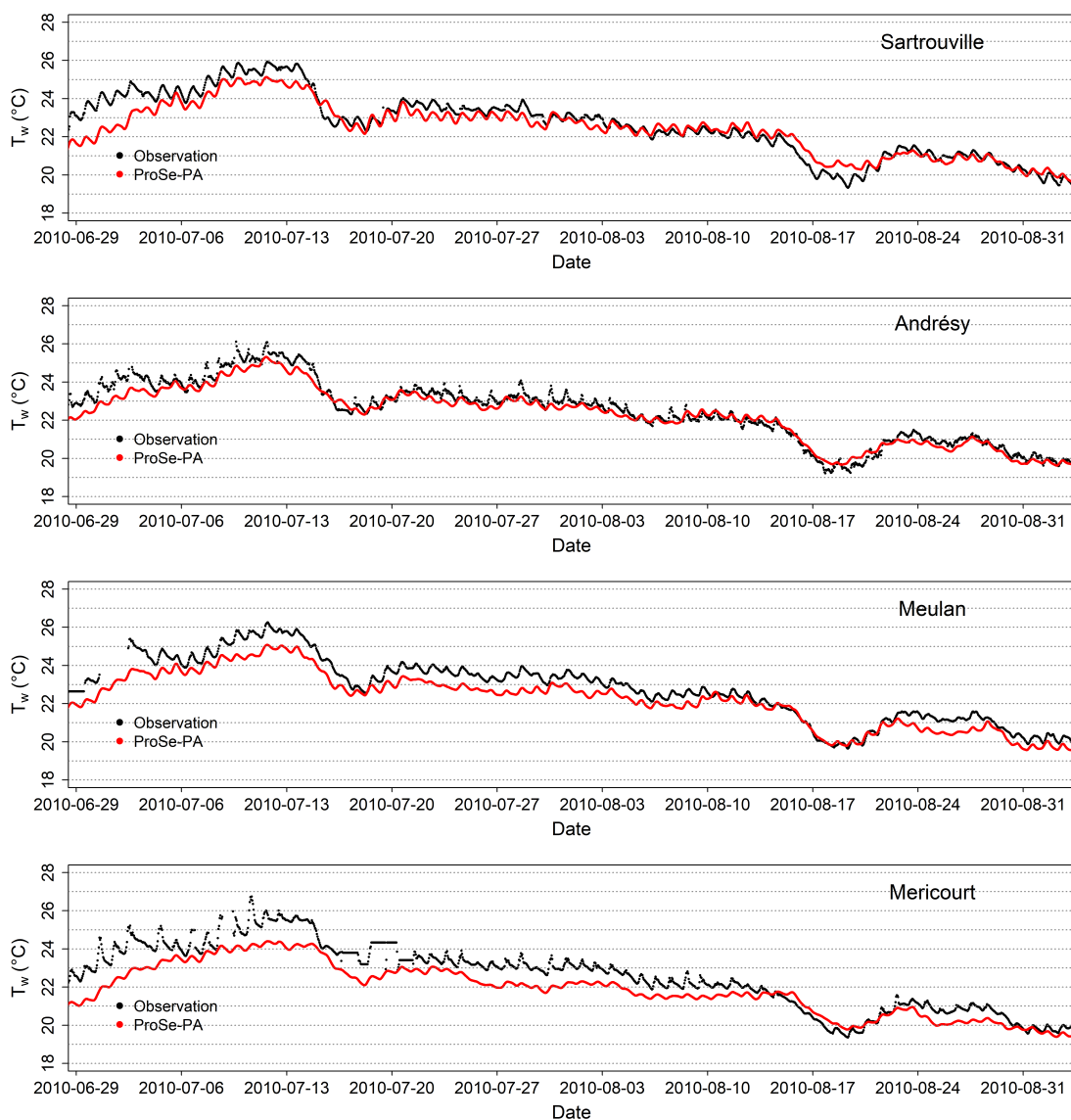


Figure 14. Températures simulées aux quatre stations aval de surveillance du SIAAP durant des canicules en 2010

3.3 Températures de l'eau simulées au long de la Seine

Les températures de l'eau restent plutôt sous-estimées aux périodes plus chaudes, particulièrement à l'aval du domaine à Poses. Afin d'avoir une vision de la variation spatiale de la température de l'eau aux périodes plus chaudes, les températures de l'eau simulées le long de la Seine le 12/07/2010 à 16 : 00 : 00 sont tracées (Fig. 15). Une diminution de la température de l'eau de l'amont vers l'aval est simulée tandis qu'elle n'est pas observée (Fig. 15). Cela illustre la difficulté de représenter correctement la temporalité et la spatialisation des échanges air-eau lors des extrêmes de température. Il serait intéressant à cet effet de mobiliser les données historiques recensées en Seine (cf. chapitre 1, p. 7).

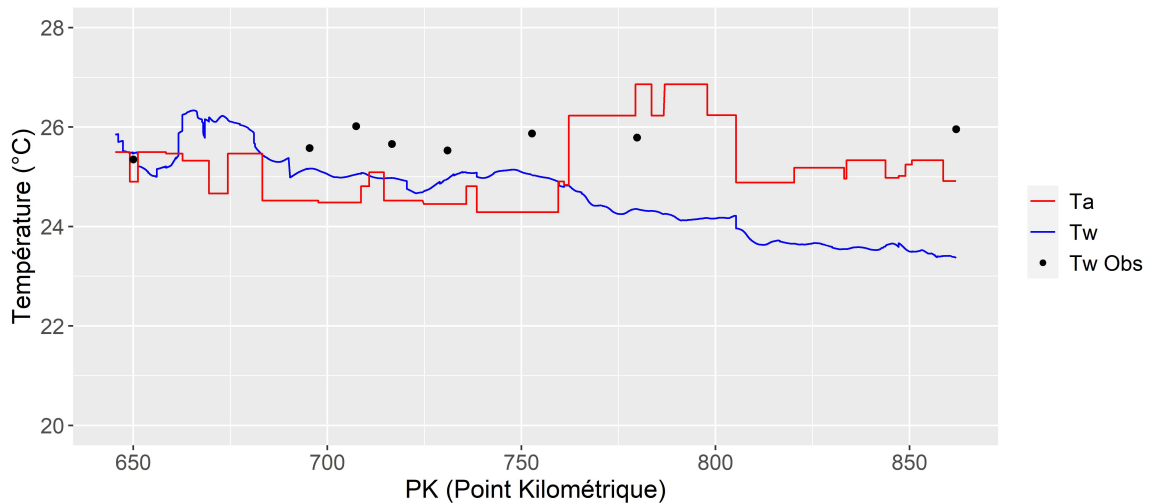


Figure 15. Températures de l'eau simulées au long de la Seine à 12/07/2010 16 : 00 : 00. Ta : Température de l'air ; Tw : Température de l'eau ; Tw Obs : Température de l'eau observée

4 Bilan d'énergie à la traversée de l'agglomération parisienne

Dans cette section, les bilans d'énergie sur l'ensemble du domaine simulé sont établis. Les prélèvements par le SEDIF et Eau de Paris (EDP) pour l'eau potable, les rejets des stations d'épuration (Seine aval et Seine centre), le rejet continu à Garges Epinay, les apports nets par Fraîcheur de Paris et les échanges à l'interface air-eau sont explicitement calculés. D'abord, un bilan pluriannuel 2008-2012 est présenté. Ensuite, les bilans saisonniers sont calculés.

4.1 Erreur simulée du bilan d'énergie

Les erreurs associées au bilan d'énergie sont également calculées à chaque pas de temps (Eq. (22)) afin de s'assurer que le modèle est bien conservatif.

$$\text{erreur} = J_{\text{end}} - J_{\text{init}} - (H_{\text{tot}} + F_{\text{in}} + F_{\text{out}} + F_{\text{lat}}) \times \Delta t \quad (22)$$

Où J_{init} (J) est l'énergie au début du temps de calcul et J_{end} (J) l'énergie à la fin du pas de temps de calcul. H_{tot} est l'échange net entre air-eau (J s^{-1}). F_{in} (J s^{-1}) représente le flux d'énergie entrant à l'amont du domaine (la Seine et la Marne) et F_{out} (J s^{-1}) le flux d'énergie sortant à l'aval du domaine (Poses) ; F_{lat} (J s^{-1}) est le flux d'énergie latéral net dû aux rejets (stations d'épuration, déversoirs d'orage), aux affluents (l'Oise et les petites

rivières) et aux prélèvements (eau potable). Δt (s) est le pas de temps de calcul. Une erreur relative est alors définie de la manière suivante (Eq. (23)) :

$$Erreur_{relative} = 100 \times \frac{erreur}{J_{end} - J_{init}} \quad (23)$$

Les erreurs relatives calculées pour 2008-2012 sont très faibles (toujours inférieures à 0.0005 % en valeur absolue, cf. Fig. 16), ce qui montre que le bilan d'énergie thermique est bien conservatif et que le calcul est pertinent.

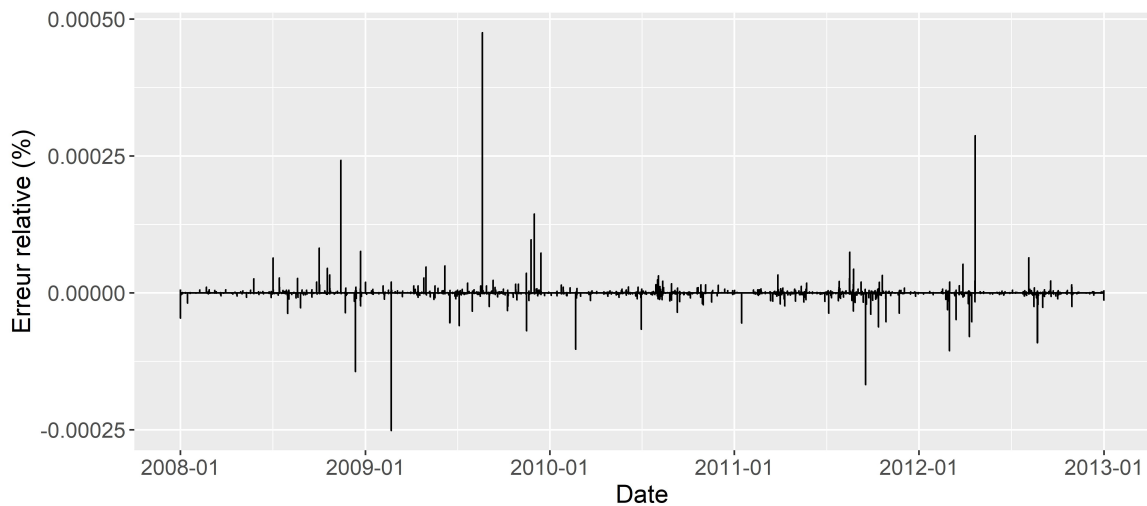


Figure 16. Erreurs relatives du bilan d'énergie thermique pour l'ensemble du domaine simulé

4.2 Bilan d'énergie pluriannuel 2008-2012

Tableau 3. Bilan d'énergie pluriannuel et saisonnier 2008-2012

Périodes	Seine	Marne	Oise	EP	FP	GE	SC	SAV	Autres	Air-eau	Poses	Stock
2008-2012	6147	3016	3490	-640	6	48	90	641	401	-22	-13151	26
Printemps	6973	3087	4431	-640	6	45	89	627	434	12	-15144	-80
Été	3683	1804	2067	-658	8	49	99	600	317	-27	-7984	-42
Automne	4151	2258	1961	-643	6	43	78	658	298	-53	-8746	11
Hiver	9822	4939	5521	-623	5	55	94	682	556	-19	-20814	218

Unité : $W m^{-2}$; *Bed area* : $3.56 \cdot 10^7 m^2$

EP : Prélèvements pour eau potable ; FP : Apports nets par Fraîcheur de Paris ; GE : Rejets à Garges Epinay ;

SC : Station d'épuration Seine centre ; SAV : Station d'épuration Seine aval ;

Autres : Autres rejets et apports nets ; Air-eau : Échanges air-eau ;

Poses : Flux d'énergie sortant à l'aval du domaine à Poses ; Stock : Variation

D'après les résultats obtenus, les flux d'énergie transportés par les grandes rivières (la Seine, la Marne, l'Oise) contrôlent l'énergie du système, soit en moyenne de $12\,646 W m^{-2}$ (ramené à la surface libre du réseau hydrographique, soit $3.56 \cdot 10^7 m^2$). En moyenne, le flux d'énergie net dû aux activités anthropiques (rejets des stations d'épuration, déversoirs d'orage, rejets nets de Fraîcheur de Paris, prélèvements d'eau potable etc.) est estimé à $546 W m^{-2}$. Concrètement, les prélèvements pour production d'eau potable (SEDIF, EDP) comptent pour $-640 W m^{-2}$ (Tab. 3), un flux négatif représentant un flux sortant du domaine. En Seine, les rejets principaux

d'énergie sont les rejets de Seine Aval (641 W m⁻²) et de Seine Centre (90 W m⁻²). De plus, le rejet à Garges Epinay représente la moitié du flux d'énergie rejeté par la station d'épuration Seine centre. Les apports nets par Fraîcheur de Paris restent très faibles, à hauteur de seulement 6 W m⁻² du fait d'un prélèvement préalable au rejet avec un différentiel de température relativement faible. Le flux d'énergie net à l'interface air-eau est estimé à -22 W m⁻². Le signe négatif représente un flux de chaleur de l'eau vers l'atmosphère, ce qui illustre qu'en moyenne l'air refroidit l'eau en Seine pour la période 2008-2012. Cependant, l'échange air-eau (-22 W m⁻²) est négligeable face aux flux d'énergie provenant des rivières et des rejets, *i.e.* échange air-eau de l'ordre de 10 à 100 W m⁻² à mettre en regard de 10 000 W m⁻² (Fig. 17).

Tableau 4. Bilans d'énergie à l'interface air-eau

Périodes	H _{sw}	H _{lw}	H _{lh}	H _{sh}	H _{tot}
2008-2012	137	-49	-106	-2	-22
Printemps	187	-64	-109	-2	12
Été	217	-66	-176	-2	-27
Automne	92	-41	-101	-3	-53
Hiver	49	-26	-40	-2	-19

Unité : W m⁻² ; Bed area : 3.56 10⁷ m²

H_{sw} : Flux d'énergie dû au rayonnement par ondes courtes

H_{lw} : Flux d'énergie net dû au rayonnement par ondes longues

H_{lh} : Flux d'énergie par évapo-condensation

H_{sh} : Flux d'énergie par conducto-convection

H_{tot} : Flux d'énergie net à l'interface air-eau

Concernant l'échange à l'interface air-eau (Eq. (2)), les flux les plus importants sont le flux d'énergie dû au rayonnement par ondes courtes (H_{sw}) et le flux d'énergie par évapo-condensation (H_{lh}). Le flux d'énergie dû au rayonnement par ondes courtes (H_{sw}) est estimé à 137 W m⁻² tandis que le flux d'énergie par l'évapo-condensation (H_{lh}) est de -107 W m⁻² (Tab. 4). De manière plus inattendue, le flux d'énergie net dû au rayonnement par ondes longues (H_{lw}) est négatif (-49 W m⁻²), et correspond ainsi à une perte d'énergie pour la rivière équivalente à la moitié de l'évaporation. Le flux d'énergie net dû au rayonnement par ondes longues est composé de trois termes (Eq. (4)) : atmosphère (positif), couverture végétale (positif), eau de rivière (négatif). Une couverture végétale nulle étant considérée dans cette étude, ce flux d'énergie négatif explique ainsi bien un refroidissement de l'eau de rivière par l'atmosphère (-22 W m⁻²).

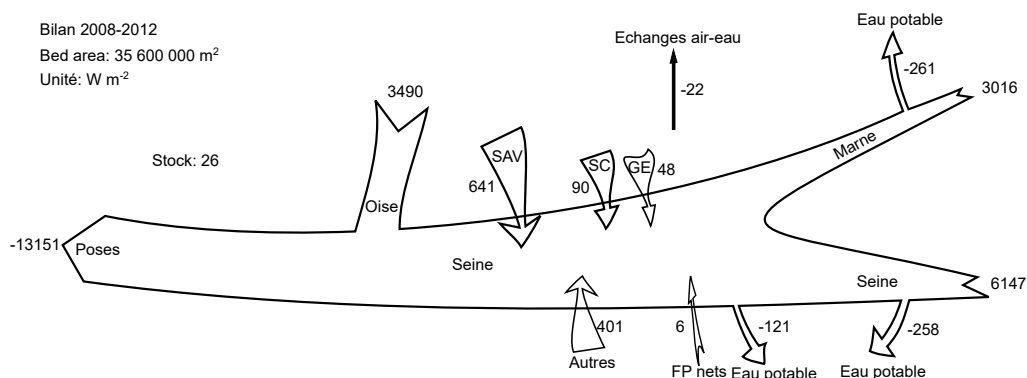


Figure 17. Bilan d'énergie pour 2008-2012. Stock : Stock d'énergie dans le système ; SAV : Station d'épuration Seine aval Aval ; SC : Station d'épuration Seine centre ; GE : Rejets Garges Epinay ; FP nets : Apports nets par Fraîcheur de Paris ; Eau potable : Prélèvements pour eau potable

Le flux d'énergie net dû aux rejets et prélèvements anthropiques (546 W m⁻²) représente un flux d'énergie

apporté au système quatre fois plus important que celui apporté par le rayonnement par ondes courtes (137 W m^{-2}), et un flux cinq fois plus important que les pertes par évaporation (-107 W m^{-2}). Finalement, la Seine stocke de l'énergie à hauteur de 26 W m^{-2} (Fig. 17).

4.3 Bilans d'énergie saisonniers

Les bilans d'énergie saisonniers (Fig. 18) sont calculés pour le printemps (les mois de mars, avril et mai), l'été (les mois de juin, juillet et août), l'automne (les mois de septembre, octobre et novembre) et l'hiver (les mois de décembre, janvier et février).

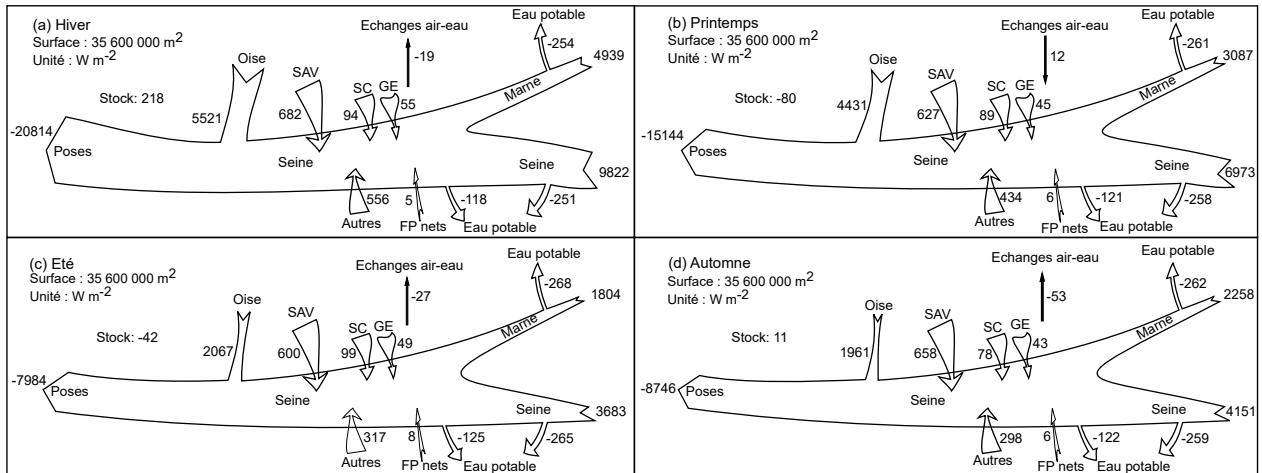


Figure 18. Bilans d'énergie saisonniers : (a) Hiver (les mois de décembre, janvier, février), (b) printemps (les mois de mars, avril et mai), (c) été (les mois de juin, juillet et août), (d) automne (les mois de septembre, octobre et novembre). Stock : Stock d'énergie dans le système ; SAV : Station d'épuration Seine aval ; SC : Station d'épuration Seine centre ; GE : Rejets Garges Epinay ; FP nets : Apports nets par Fraîcheur de Paris ; Eau potable : Prélèvements pour eau potable

Pour les flux d'énergie apportés par les grandes rivières (la Seine, la Marne et l'Oise), on observe clairement une variation saisonnière notamment due à la variation de débit : maximum en hiver et minimum en été (Fig. 18 et Tab. 3). Les flux d'énergie dus aux prélèvements pour la production d'eau potable restent relativement constants, avec une légère augmentation en été liée à l'augmentation de la température de l'eau. Les apports par Fraîcheur de Paris augmentent de plus de 50% en été par rapport à l'hiver du fait de l'augmentation de la température de l'eau et de prélèvements d'eau plus importants en été (Fig. 4 et Fig. 5).

Quant aux échanges air-eau, l'atmosphère réchauffe légèrement l'eau de rivière au printemps (12 W m^{-2}) et la refroidit ensuite en été (-27 W m^{-2}), automne (-53 W m^{-2}) et hiver (-19 W m^{-2}). On peut observer l'augmentation du flux d'énergie dû au rayonnement par ondes courtes en été (Tab. 4, H_{sw} , 217 W m^{-2}) et également pour le flux d'énergie par évapo-condensation (Tab. 4, H_{lh} , 176 W m^{-2}). Le flux d'énergie net à l'interface air-eau (H_{tot}) est notamment contrôlé par le rayonnement dû aux ondes courtes (H_{sw}) et à l'évapo-condensation (H_{lh}), qui conduit globalement à un refroidissement de l'eau par l'atmosphère. Malgré la forte irradiance en été, le flux d'énergie par évapo-condensation (H_{lh}) augmente très rapidement aussi (Tab. 4).

Conclusion

Dans le cadre du développement du logiciel ProSE-PA, le bilan des échanges thermiques à l'interface air-eau via la librairie *libseb* et le transport de chaleur en rivière via la librairie *libttc* ont été implémentés. L'équation

de transport de chaleur implémentée dans PROSE-PA a d'abord été validée par une simulation en conditions contrôlées dans une étude précédente (Wang et al., 2021). Les résultats issus des premières simulations ont montré une sous-estimation des températures de l'eau en été par PROSE-PA.

Afin d'améliorer la simulation des températures de l'eau en Seine, les rejets (débit et température de l'eau) de Fraîcheur de Paris ont été estimés par une régression polynomiale multiple. De plus, les températures de l'eau associées aux rejets par la station d'épuration Seine aval ont été ajustées.

La simulation des températures de l'eau est réalisée sur la période 2008-2012. Les températures simulées sont comparées aux températures mesurées par le SIAAP, Fraîcheur de Paris et le RNT. D'après les résultats obtenus, PROSE-PA simule très bien les températures de l'eau en Seine, les RMSEs variant entre 0.51 °C et 0.85 °C aux stations du SIAAP et Fraîcheur de Paris. Les coefficients de corrélation sont quasiment tous supérieurs à 0.99. Les Pbias sont inférieurs à 5% pour toutes les stations en valeur absolue. Seulement à l'aval du domaine à Poses, une RMSE de 1.11 °C est obtenue. Les températures de l'eau à Poses restent cependant légèrement sous-estimées durant les périodes les plus chaudes.

Un bilan d'énergie pluriannuel 2008-2012 et des bilans saisonniers associés (printemps, été, automne, hiver) sont calculés sur l'ensemble du domaine simulé. Les flux d'énergie transportés par les grandes rivières (la Seine, la Marne et l'Oise) contrôlent les flux d'énergie (de l'ordre de plusieurs milliers de $W m^{-2}$) ainsi que l'énergie contenue dans le système. Les flux d'énergie provenant des rejets anthropiques et ceux liés aux échanges eau-atmosphère sont faibles au regard des flux régionaux.

En moyenne, le flux d'énergie net dû aux rejets et prélèvements anthropiques ($546 W m^{-2}$) représente un flux d'énergie apporté au système quatre fois plus important que celui apporté par le rayonnement par ondes courtes ($137 W m^{-2}$) ou encore cinq fois plus grand que les pertes par évaporation ($107 W m^{-2}$). Cependant, les flux d'énergie nets dûs aux rejets et prélèvements anthropiques contribuent au réchauffement des eaux en périodes critiques estivales où la température de l'eau peut dépasser 25 °C.

Les bilans montrent que l'atmosphère a tendance à refroidir l'eau en Seine (en moyenne de $22 W m^{-2}$). Plus concrètement, ce refroidissement est notamment lié à l'évapo-condensation, surtout en été ($176 W m^{-2}$). Le bilan d'énergie de printemps (mois de mars, avril, mai) indique un apport de chaleur de l'atmosphère vers l'eau de rivière ($12 W m^{-2}$). Le flux d'énergie dû au rayonnement par ondes courtes (H_{sw}) et la chaleur latente par évapo-condensation (H_{lh}) sont les deux composantes principales d'échange de chaleur à l'interface air-eau.

Remerciements Cette étude a été partiellement financée par le projet **CONSACRE** (CONTinuite écologique de la Seine et intérêt des ACteurs pour sa REstauration) du CPIER Vallée de Seine. Les auteurs remercient les contributeurs de données Fraîcheur de Paris, SEDIF et SIAAP.

Pour retrouver les outils et données

Le logiciel PROSE-PA est distribué sous licence EPL v2.0. Sa version la plus à jour est téléchargeable sur son [dépôt de développement](#).

Références

Benyahya, L., D. Caissie, M. G. Satish, and N. El-Jabi (2012). Long-wave radiation and heat flux estimates within a small tributary in catamaran brook (new brunswick, canada). *Hydrological Processes* 26(4), 475–484.

- Bowen, I. S. (1926, Jun). The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Phys. Rev.* 27, 779–787.
- Boyd, M. and B. Kasper (2003). Analytical methods for dynamic open channel heat and mass transfer : Methodology for the heat source model version 7.0. Technical report, Oregon Department of Environmental Quality, Portland, OR.
- Dingman, S. (2008). *Physical Hydrology*. Waveland Press.
- Even, S. (1995). *Modélisation d'un écosystème fluvial : la Seine - Le modèle PROSE*. Ph. D. thesis, Centre d'Informatique Géologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Even, S., M. Poulin, J. Garnier, G. Billen, P. Servais, A. Chesterikoff, and M. Coste (1998). River ecosystem modelling : Application of the PROSE model to the Seine river (France). *Hydrobiologia* 373, 27–45.
- Even, S., M. Poulin, J. M. Mouchel, M. Seidl, and P. Servais (2004). Modelling oxygen deficits in the Seine river downstream of combined sewer overflows. *Ecol. Model.* 173, 177–196.
- Flipo, N., S. Even, M. Poulin, M. H. Tusseau-Vuillemin, T. Améziane, and A. Dauta (2004). Biogeochemical modelling at the river scale : Plankton and periphyton dynamics - Grand Morin case study, France. *Ecol. Model.* 176, 333–347.
- Flipo, N., C. Rabouille, M. Poulin, S. Even, M. H. Tusseau-Vuillemin, and M. Lalande (2007). Primary production in headwater streams of the Seine basin : the Grand Morin case study. *Sciences of Total Environment* 375, 98–109.
- Leach, J. A. and R. D. Moore (2010). Above-stream microclimate and stream surface energy exchanges in a wildfire-disturbed riparian zone. *Hydrological Processes* 24(17), 2369–2381.
- Magnusson, J., T. Jonas, and J. W. Kirchner (2012). Temperature dynamics of a proglacial stream : Identifying dominant energy balance components and inferring spatially integrated hydraulic geometry. *Water Resources Research* 48(6).
- Sinokrot, B. and H. Stefan (1993). Stream temperature dynamics : Measurements and Modeling. *Water Resources Research* 29(7), 2299–2312.
- Vilmin, L., N. Aissa-Grouz, J. Garnier, G. Billen, J. M. Mouchel, M. Poulin, and N. Flipo (2015). Impact of hydro-sedimentary processes on the dynamics of soluble reactive phosphorus in the Seine River. *Biogeochemistry* 122, 229–251.
- Wang, S. (2019, Septembre). *Simulation du métabolisme de la Seine par assimilation de données en continu*. Theses, Mines Paris – PSL.
- Wang, S., N. Flipo, A. Bordet, J. Bernier, M. Merchat, and V. Rocher (2021). Transport de chaleur par la seine à la traversée de l'agglomération parisienne. Rapport annuel PIREN-Seine, PIREN-Seine.
- Wang, S., N. Flipo, and T. Romary (2019). Oxygen data assimilation for estimating micro-organism communities' parameters in river systems. *Water Research* 165, 115021.
- Webb, B. and Y. Zhang (1997). Spatial and seasonal variability in the components of the river heat budget. *Hydrological Processes* 11, 79–101.

Projections des températures de l'eau de la Seine à Paris à l'horizon 2100¹

Agnès Rivière¹, Daphné Ladet², William Thomas³, Guillaume Le Breton⁴,

Agnès Ducharne⁵ et Ludovic Oudin⁵

¹ Mines Paris-PSL, Centre de Géosciences, Fontainebleau

² Université Claude Bernard Lyon 1

³ DRIEAT Île-de-France

⁴ École centrale Nantes

⁵ Sorbonne Université

Mail contact : agnes.riviere@minesparis.psl.eu

Résumé

Ce rapport est le fruit d'un travail réalisé entre la DRIEAT et des scientifiques du PIREN-Seine.

La température de l'eau est un facteur déterminant de la vie des rivières et conditionne les activités industrielles. Dans cette optique, l'objectif de cette étude est d'établir l'évolution de la température de la Seine et de la Marne dans l'agglomération parisienne depuis la fin du XIX^e siècle jusqu'à l'horizon 2100. Les travaux sont basés sur des méthodes de machine learning, qui sont très efficaces pour l'exploration de jeux de données massifs et sont déjà utilisées en climatologie, météorologie ou hydrologie. Elles ont été retenues pour déterminer les futures températures jusqu'à l'horizon 2100. Les projections de température de l'air estimées à la station proche d'Orly par 12 instituts européens, selon 3 scénarios des émissions terrestres en CO₂ (RCP 2.6, 4.5 et 8.5) ont été téléchargées depuis le site web DRIAS.

Ces modélisations annoncent une accélération de la hausse notamment dans le scénario RCP 8.5 à l'horizon 2100 : augmentation de la température moyenne annuelle de 2,7 °C et multiplication par 3 des périodes chaudes (>25,5 °C) depuis nos jours.

Points clés

- *La température de l'eau de la Seine et de la Marne est prédite jusqu'en 2100 pour quatre stations*
- *Les projections de la température de l'eau prédisent une augmentation par 10 du nombre de jours supérieur à 25,5 °C par année*

1. Pour citer cet article : Rivière. A, Ladet. D., Thomas. W, Le Breton, G, Ducharne. A., Oudin. L., Projections des températures de l'eau de la Seine à Paris à l'horizon 2100. Dans Rivière. A. (ed), *Transferts de chaleur et températures des eaux*, PIREN-Seine, Rapport de synthèse phase VIII, Volume 4, 2023, pp. 97-120

Abstract

This study is the outcome of a collaboration between DRIEAT and researchers from PIREN-Seine. Based on the fact that the temperature of rivers is pivotal in shaping the ecology of water bodies and holds significant importance for various industrial processes this research aims at forecasting the mean daily temperature of both the Marne and Seine rivers in Paris, spanning from the late 19th century to the year 2100.

Leveraging machine learning techniques, known for their efficacy in exploring vast datasets, this study employed these methods to project future temperatures up to 2100. Utilizing air temperature projections from 12 European institutes, obtained from the DRIAS website, the study considered three scenarios of terrestrial CO₂ emissions (RCP 2.6, 4.5, and 8.5).

These models indicate a notable acceleration in temperature rise, particularly evident in the RCP 8.5 scenarios by 2100: a projected increase in the average annual temperature by 2.7°C and a threefold surge in hot periods (>25.5°C) compared to current conditions.

Key points

- *Water temperature of the Seine and Marne rivers is predicted until 2100 for four stations.*
- *Water temperature projections predict a 10-fold increase in the number of days per year above 25.5°C.*

Sommaire

Sommaire	97
Introduction.....	98
1 Contexte	99
2 Méthodologie : Projections des températures de l'eau par l'utilisation d'approches multivariées de <i>machine learning</i>	101
3 Projection de la température de l'eau de la Seine	105
4 Résultats et discussions	108
5 Projections climatiques de la température de l'eau de 2020 à 2100	109
Conclusion et perspectives.....	115
Bibliographie.....	116

Introduction

La température d'un cours d'eau joue un rôle fondamental de la qualité de l'eau en contrôlant fortement de nombreux processus physiques, chimiques et biologiques dans les rivières et dans la dynamique des écosystèmes aquatiques (Caissie, 2006 ; Dallas and Ross-Gillespie, 2015; Isaak et al., 2012 ; Marmonier et al., 2012 ; Olden and Naiman, 2010; Poole and Berman, 2001). Les changements de température de l'eau affectent les quantités d'oxygène dissous (DREAL Pays de la Loire, 2016 ; Ducharme, 2008 ; Marzadri et al., 2013 ; Matthews and Berg, 1997; Vega et al., 1998), la transformation des nitrates (Ficklin et al., 2013 ; Pan et al., 2021) et également le cycle du carbone (Comer-Warner et al., 2018). Elle influe sur la distribution spatiale des organismes vivants, leur croissance, leur reproduction (Maheu et al., 2016), leur comportement ainsi que leur état sanitaire (Dallas and Rivers-Moore, 2012; Fullerton et al., 2017; Stanford and Boulton, 1993).

La température de l'eau des rivières est soumise à des changements diurnes, quotidiens, saisonniers, annuels et pluriannuels. Les changements saisonniers sont la conséquence de l'influence des facteurs climatiques géographiques, tandis que les changements pluriannuels peuvent également indiquer l'impact de facteurs régionaux. Actuellement, toutes les observations prouvent que la température de l'air augmente fortement (Allen, and Barros, Vicente Broome et al., 2014; Bates et al., 2008; IPCC, 2018; Shukla et al., 2019).

L'intérêt pour la prédiction de la température de l'eau des rivières est lié au rôle écologique et économique de la température, mais également pour les usages de l'eau. De nombreux facteurs affectent la température de l'eau des rivières, tels que les conditions météorologiques, les conditions du lit de la rivière, la topographie de la rivière et le débit (Caissie, 2006). Les régimes thermiques des eaux des grands cours sont influencés par les échanges thermiques entre l'eau et l'atmosphère (Dugdale et al., 2017 ; Ficklin et al., 2013 ; Mohseni and Stefan, 1999). Le changement climatique augmente la température de l'eau des cours d'eau et modifie leur régime thermique (Isaak et al., 2012, 2010). Parmi les nombreuses conséquences du réchauffement climatique figurent des périodes caractérisées par de faibles précipitations et de hautes températures. De fortes températures associées à de faibles débits provoquent donc des conditions critiques maximales non seulement pour les écosystèmes, mais aussi pour les activités industrielles dont la production d'énergie électrique et le refroidissement, la production d'eau potable (problème de formation de bromate), et divers procédés industriels (nettoyage, biofilm...). Des arrêtés, ainsi que des textes réglementaires ont été mis en place, notamment pour limiter les rejets thermiques afin de préserver au mieux les écosystèmes. Par exemple, l'arrêté ministériel du 2 février 1998 (ATEP9870017A) implique des restrictions sur les rejets thermiques. La température des rejets doit être inférieure à 21,5 °C pour les eaux salmonicoles et 28 °C pour les eaux cyprinicoles sans entraîner une hausse respective de plus de 1,5 °C ou 3 °C. Cependant, certaines mesures ont été mises en place quant à la consommation de l'eau : de l'eau destinée à de la production alimentaire ne peut être prélevée si la température de celle-ci dépasse les 25 °C.

La gestion durable des ressources en eau, tant du point de vue de sa qualité physico-chimique et écologique, en passant par son potentiel de production d'énergie, sera sous-tendue dans le futur par notre capacité à anticiper les effets du changement climatique, l'évolution des demandes, et les nouveaux systèmes de gouvernance relatifs à la gestion des milieux anthropisés (gestion des infrastructures, politiques de développement territorial) (Ouellet et al., 2020). Il est ainsi impératif de décrire aussi précisément que possible les évolutions des températures dans les différents compartiments tout en tenant compte des changements globaux.

Différents modèles ont été développés pour étudier l'hétérogénéité thermique à différentes échelles

temporelles et spatiales, la nature de la disponibilité passée et les tendances futures probables (Webb and Nobilis, 2007). En général, la température de l'eau dans les rivières est modélisée par des modèles basés sur des processus, des modèles statistiques ou des modèles à base physique approchés. Les modèles à base physique représentent les processus physiques contrôlant la température des rivières. Selon (Dugdale et al., 2017), ces modèles sont basés sur deux étapes clés : d'abord, le calcul des échanges de flux d'énergie entre la rivière et l'air, puis la détermination du changement de température dans une deuxième étape. Calculer les flux d'énergie signifie résoudre l'équation du bilan énergétique pour un tronçon de rivière en considérant les flux de chaleur aux interfaces air-eau et lit de la rivière-eau (Beaufort et al., 2016). Ces composantes exigeantes du bilan énergétique sont dérivées soit des mesures de terrain, soit par des approximations (Dugdale et al., 2017 ; Ouellet et al., 2020 ; Webb et al., 2008). Il est difficile de valider la paramétrisation de ce type de modèle. Bien qu'il ne soit pas possible de surveiller ces composantes sur de longues périodes ou en tout point d'un réseau fluvial et des bassins-versants contributeurs, elles présentent des avantages évidents : (i) donner un aperçu des facteurs de contrôle de la température de l'eau des rivières (ii) informer sur les métriques, qui peuvent être utilisées dans des modèles statistiques plus importants et (iii) simuler différents scénarios d'impact (S.J. Dugdale et al., 2017). Ces arguments sont également les raisons pour lesquelles les modèles à base physique sont largement utilisés malgré leur grande complexité.

Les modèles statistiques et des modèles de *machine learning* sont regroupés en approches paramétriques, y compris la régression et les modèles stochastiques et les approches non paramétriques basées sur des algorithmes de calcul comme les réseaux neuronaux. Contrairement aux modèles à base physique, les modèles statistiques ne peuvent pas informer sur les mécanismes de transfert d'énergie dans une rivière (Stephen J. Dugdale et al., 2017). Les méthodes de *machine learning* sont efficaces dans l'exploration et dans l'exploitation des informations à travers un grand nombre de données. Ces outils sont capables d'établir des relations entre de multiples variables, rendant donc possible une meilleure représentation, et donc une compréhension d'un grand nombre de processus. Le *machine learning* a suscité un fort intérêt de la part de la communauté scientifique, spécialement dans les domaines touchant au futur de la planète, comme la climatologie, la météorologie ou l'hydrologie. En effet, cet outil prend sens, notamment dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique. Le modèle de prédiction des températures de l'eau de la Seine sera donc basé sur l'utilisation du *machine learning*. Cependant, contrairement aux modèles à base physique, ils ne nécessitent pas un grand nombre de variables d'entrée, qui ne sont pas disponibles dans de nombreux cas. Les modèles statistiques non paramétriques ont attiré une attention accrue au cours des dernières années. En particulier, les méthodes de *machine learning* se sont avérées être des outils utiles pour la modélisation de la température des rivières (Zhu and Piotrowski, 2020).

L'objectif de cette étude est d'analyser la variabilité spatiale des régimes thermiques des cours d'eau à l'échelle de l'agglomération parisienne ; elle contribue ainsi à mieux connaître et comprendre l'état thermique de la Seine. En particulier, elle vise à :

- Reproduire la température de la Seine observée à partir des données de température de l'air,
- Simuler des projections thermiques de la Seine à partir de plusieurs scénarios climatiques disponibles sur DRIAS (DRIAS, 2020).

1 Contexte

1.1 Bassin de la Seine et ses stations de mesures

Le bassin Seine-Normandie, situé dans le nord de la France, d'altitude homogène, avec moins de 1 % du bassin-versant au-dessus de 550 m, comporte 55 000 km de rivière, dont la Seine et ses principaux affluents : l'Yonne, La Marne et l'Oise, s'écoulant du sud-est vers le nord-ouest. La Seine est un fleuve

d'ordre de Strahler 7 au niveau de Paris, elle prend sa source sur le plateau de Langres à 450 m d'altitude et se jette 773 km plus loin dans la mer de la Manche. Sa largeur est en moyenne 130 m et sa profondeur est de 4,5 m au niveau de Paris. De nombreuses écluses et barrages présents sur son cours contrôlent sa hauteur d'eau et permettent un mélange homogène de l'eau, excluant un gradient de température vertical. Le climat du bassin Seine-Normandie est tempéré avec des influences océaniques.

Depuis la fin du XX^e siècle, la surveillance de la température de l'eau dans la Seine consistait principalement en des mesures ponctuelles sur quelques rivières. À la fin des années 80, l'intérêt pour l'étude des processus thermiques s'est accru. Ces dernières années, cet intérêt s'est considérablement développé et le suivi de cette variable est devenu une priorité pour les gestionnaires des ressources en eau. Cette base de données permet de dresser un inventaire complet des données historiques sur la température. De plus, la mise en œuvre de la collecte de données avec des protocoles appropriés et des méthodes pour optimiser le réseau étaient nécessaires.

Dans le cadre de cette étude, nous nous focaliserons sur des stations positionnées sur la Seine et sur la Marne. Cela nous permettra d'avoir une vue globale et d'étudier les variations de température de l'eau de part et d'autre de Paris. Il est important de couvrir une grande partie du bassin, afin de pouvoir mettre en avant un comportement similaire. Au total, nous exploiterons les données de quatre stations qui sont les suivantes, la Seine à Paris, la Seine à Choisy-le-Roi, la Seine à Bougival et la Marne à Neuilly-sur-Marne (Figure 1). Les données de températures de l'air utilisées sont celles de la station d'Orly de la base SAFRAN.

La carte de la Figure 1 représente la position des stations étudiées sur la Seine et la Marne.

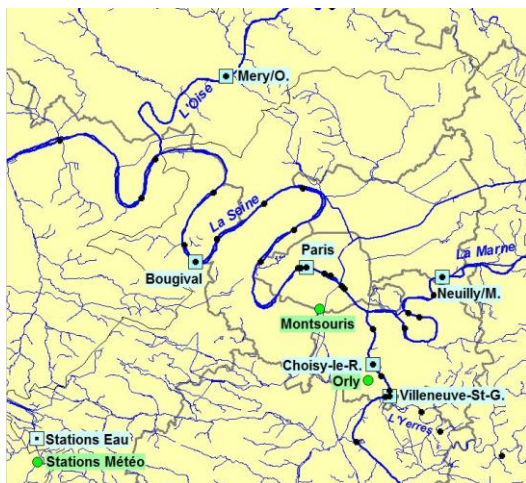


Figure 1 : Cartes de la localisation des stations

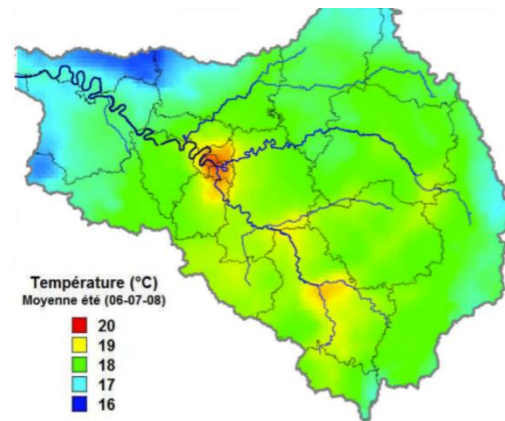


Figure 2 : Représentation des moyennes de température de l'air de juin à aout de 1950 à 2005 du bassin Seine-Normandie

La carte de la Figure 2 représente la moyenne des températures des mois de juin à aout de 1950 à 2005. La température maximum est observée pour Paris et sa périphérie, zone en effet connue pour être un îlot de chaleur urbain. La température de l'air est un paramètre clé dans la compréhension de la dynamique des variations de la température de l'eau. En effet, la largeur des fleuves engendre une surface de contact entre l'eau et l'atmosphère suffisamment grande favorisant les échanges thermiques.

1.2 Disponibilités des données

Au vu de la richesse de la base de données disponible, nous prendrons en compte les données de 1980 à 2020 pour les différentes stations citées précédemment. La base de données regroupe les données de moyenne de température journalière pour l'eau. Suivant la station étudiée et notamment suivant l'année, des données peuvent manquer, que ce soit en raison d'une dégradation des capteurs, de défauts de transmission, d'un défaut de stockage des données ou de la date de la mise en place de la station. En effet, pour les stations de la Seine à Choisy-le-Roi, la Marne à Neuilly-sur-Marne ainsi que la Seine à Bougival, nous avons accès à un grand nombre de données de 1990 à 2002 ainsi qu'un jeu de données complet de 2003 à 2020 (Tableau 1). Elles correspondent aux représentations de la température de l'eau en fonction de la température de l'air qui sont les plus complètes. Cependant, certaines stations ne sont pas dans ce cas, comme les stations de l'Oise à Méry-sur-Oise et de l'Yerres à Villeneuve-Saint-Georges, qui sont plus pauvres en données et seront traitées ultérieurement avec une seconde méthodologie.

Tableau 1 : Description des données des stations utilisées

Station	Rivière	Pas de temps	Période		Nombre (Années et de données)	
Choisy-le-Roi	Seine	Journalier	17/02/1987	19/01/2021	35	12 091
Paris	Seine	Horaire	15/02/1994	31/12/2020	26	8 789
Neuilly-sur-Marne	Marne	Journalier	31/05/1984	31/12/2020	37	12 596
Bougival	Seine	Horaire	01/01/1995	31/12/2020	26	8 400

2 Méthodologie : Projections des températures de l'eau par l'utilisation d'approches multivariées de *machine learning*

La vue d'ensemble de la méthodologie utilisée est illustrée à la Figure 1. La première étape consiste à sélectionner les prédicteurs (variables explicatives) les plus appropriés pour la prédiction de la température de l'eau grâce au module scikit-learn (Buitinck et al., 2013 ; Pedregosa et al., 2011).

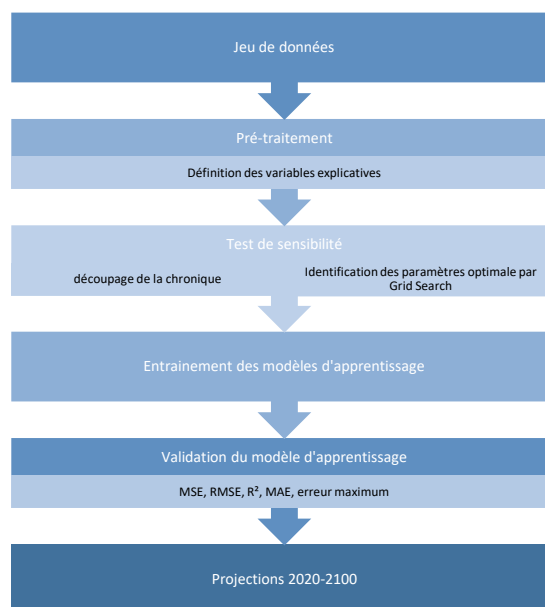


Figure 1 : Architecture de la méthode du choix et d'optimisation des modèles

2.1 Variables explicatives

Une étude de sensibilité a été réalisée en testant les diverses variables météorologiques, dont l'humidité de l'air, les précipitations, l'évapotranspiration potentielle (ETP), le débit de la rivière, le rayonnement incident, la vitesse du vent, la température maximale (T_{\max}), la température minimum (T_{\min}) et la température moyenne (T_{moy}) journalière de l'air. Les températures de l'air maximum, minimum et moyenne sont les principaux paramètres expliquant le comportement de la température de l'eau.

Des études antérieures ont montré que les informations sur les dates améliorent la prédiction de la température de l'eau (Graf et al., 2019; Zhu et al., 2018 ; Zhu and Heddam, 2019). Cela inclut les dates exprimées en tant que jour de l'année, selon le calendrier grégorien (c'est-à-dire année, mois, jour).

Pour améliorer ces approches, les variables d'état ont été transformées en différentes caractéristiques : variables décalées, moyennes glissantes, médianes. Les variables décalées sont des caractéristiques contenant des données provenant d'étapes temporelles antérieures. Les décalages ont été définis sur la base de variables quotidiennes. Ces décalages ont été calculés entre 1 et 30 jours. Les médianes et les moyennes glissantes ont été calculées sur des périodes de 3 jours à 30 jours. Ces caractéristiques ont également été multipliées entre elles. Le test de sensibilité des variables explicatives a été réalisé grâce au module *scikit-learn* (Buitinck et al., 2013 ; Pedregosa et al., 2011). Les prédicteurs du modèle ont été choisis en fonction de l'importance qu'ils prenaient dans la prédiction. Cette importance a pu être déterminée grâce à la fonction *model.feature_importances*. Pour les modèles finaux, seules les variables dont l'importance était supérieure à 0,0001 ont été conservées. Les autres variables sont considérées comme n'ayant pas d'impact sur le résultat des prédictions. Deux autres transformations des variables explicatives ont également été utilisées : la transformation de Fourier et les transformés en ondelette.

2.1.1 La transformée de Fourier

La transformée de Fourier est utilisée pour transformer un signal de son domaine temporel à son domaine fréquentiel. Les pics du spectre de fréquences indiquent les fréquences les plus fréquentes du signal. Plus un pic est grand et net, plus une fréquence est prévalente dans un signal. L'emplacement (valeur de la fréquence) et la hauteur (amplitude) des pics du spectre de fréquence peuvent ensuite être utilisés comme des variables explicatives.

En règle générale, cette approche consistant à utiliser la transformée de Fourier fonctionne très bien lorsque le spectre de fréquences est stationnaire. En d'autres termes, les fréquences présentes dans le signal ne dépendent pas du temps ; si un signal contient une fréquence de x Hz, cette fréquence devrait être présente partout de la même manière dans le signal. Plus un signal est non stationnaire/dynamique, plus les résultats seront mauvais.

Nous avons utilisé une périodicité de 365 jours pour décrire l'effet saisonnier interannuel de la variation de la température de l'air. Nous n'avons toutefois pas eu la possibilité d'effectuer des tests de sensibilité sur le nombre de coefficients sinus et cosinus à inclure dans la décomposition et n'avons donc utilisé qu'un seul coefficient sinus et cosinus (Figures 4 et 5).

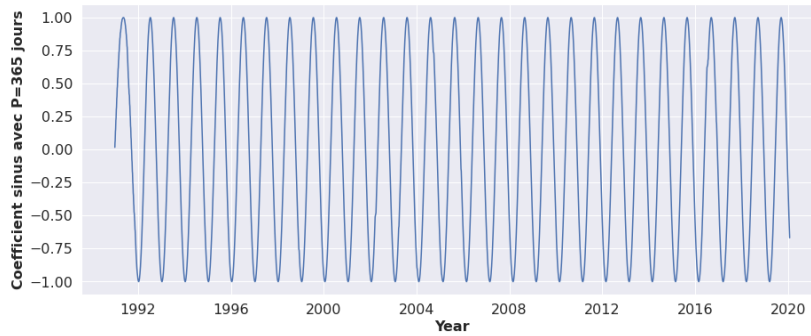


Figure 2 : Coefficients sinus de la transformée de Fourier de la température de l'air

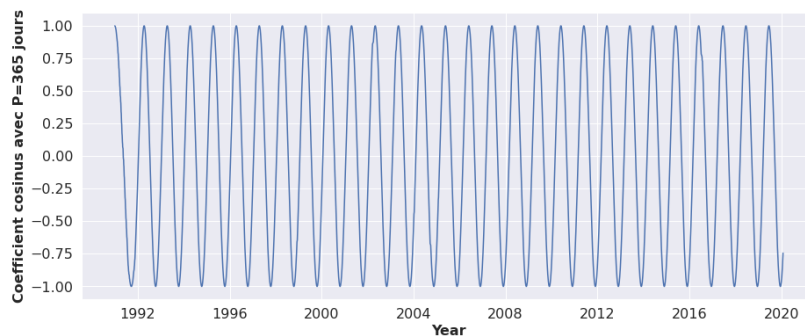


Figure 3 : Coefficients de cosinus de la transformée de Fourier de la température de l'air

2.1.2 Les transformées en ondelettes

Les transformations en ondelettes sont utilisées depuis longtemps pour le traitement du signal. Les données brutes de chroniques de données peuvent être décomposées en ondelettes. Le principal problème de l'application de la transformation en ondelettes est la sélection de l'ondelette mère et du niveau de décomposition (Ibrahim et al., 2015; Nourani et al., 2011 ; Nourani et Parhizkar, 2013 ; Sang, 2012). La méthode de la transformée en ondelettes discrètes (DWT) a été utilisée dans cette étude pour décomposer les données brutes de la chronique des températures de l'air, car les études ont montré que la DWT présente une plus grande efficacité et est plus simple à utiliser (Adamowski and Chan, 2011; Montalvo et García-Berrocal, 2015). Pour la DWT, des techniques de filtrage numérique sont utilisées pour générer un signal temporel. Les coefficients détaillés et les séries d'approximation sont obtenus à l'aide de l'algorithme des ondelettes une fois que les données brutes de la série temporelle sont passées par des filtres passe-haut et passe-bas (Zhang et Li, 2001). Le filtre est répété chaque fois qu'une partie du signal est traité puis éliminé, ce qui permet d'obtenir l'approximation (A) et un ou plusieurs détails (D). Il existe de nombreux types d'ondelettes, dont les ondelettes de Daubechies, Symmlet, Haarn. Pour la DWT, les plus couramment utilisées sont les ondelettes de Daubechies. L'ondelette de Daubechies de niveau 10 (Db10) a été largement utilisée, car ses coefficients d'ondelettes peuvent capturer la quantité maximale d'énergie du signal (Jensen, 2000; Wang et al., 2013). La Db10 a donc été utilisée dans cette étude. Le nombre de niveaux de décomposition peut être déterminé à l'aide de la méthode fournie par (Nourani et al., 2009) dans notre étude, le niveau de décomposition est de 8. Lorsque la chronique des températures de l'air est transformée par l'ondelette, nous obtenons une partie d'approximation (A) et huit détails (D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7 et D8). La Figure 4 présente les résultats de la température de l'air pour la station de la Seine à Paris.

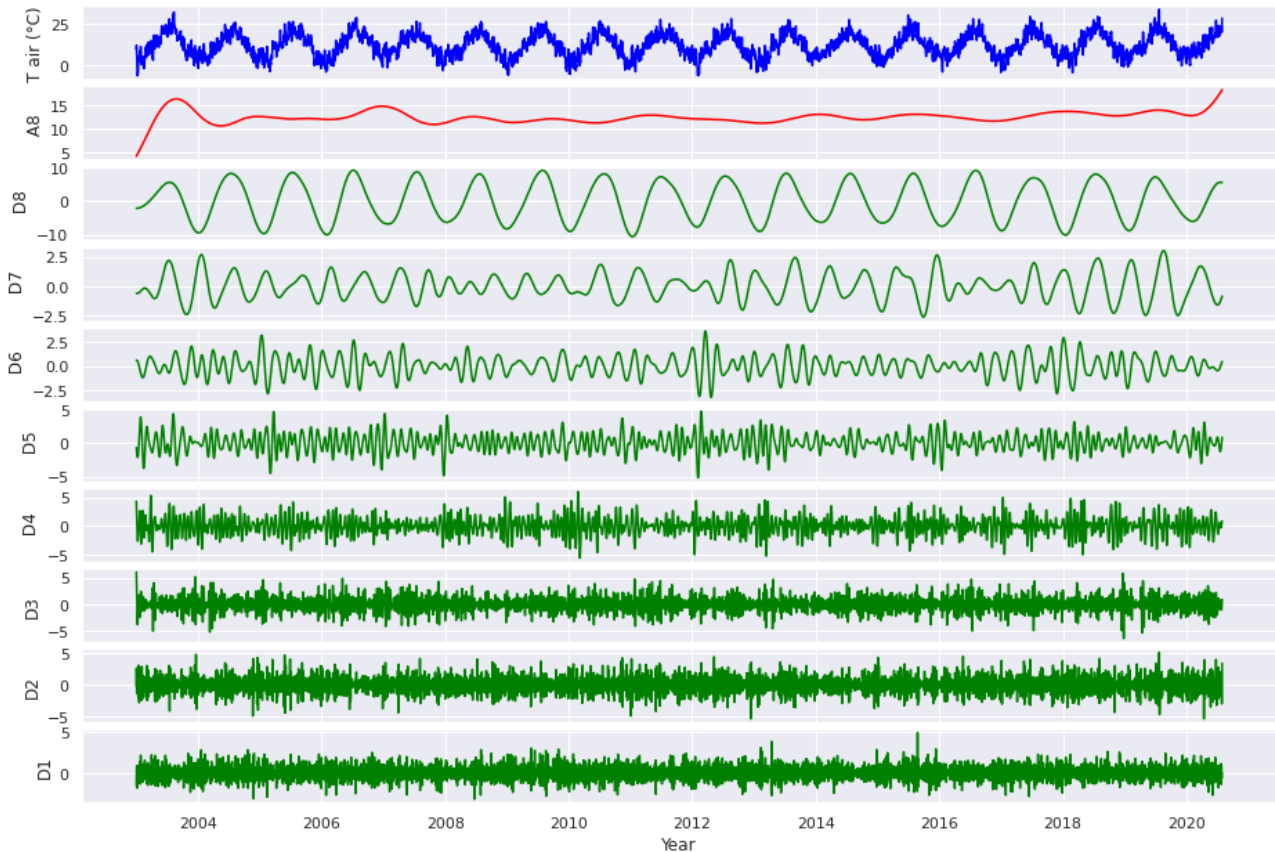


Figure 4 : Chronique de température de l'air à Orly et décompositions de cette chronique en utilisant l'ondelette db10. A8) approximation. D1), D2), D3), D4), D5), D6), D7) et D8) : détails

2.2 Périodes d'entraînement et de validations des modèles

Les périodes d'entraînement doivent être plus longues que les périodes de validations. De plus, ces deux périodes ne doivent pas se superposer pour assurer la validité du modèle. Les périodes d'entraînement ont été choisies en fonction des stations et des manques de données. Cette période ne doit contenir aucun manque de données de plus de 7 jours.

2.3 Critère d'évaluation

Quatre indicateurs de performance de modélisation, tels que le coefficient de corrélation (r), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur absolue moyenne (MAE) et l'erreur maximum, sont utilisés pour évaluer les performances des modèles. Les formules des différents critères sont données ci-dessous :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} (y_{pred}^i - y_{obs}^i)^2}$$

Équation 1

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{pred}^i - y_{obs}^i|$$

Équation 2

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{obs}^i - \overline{y_{obs}})(y_{pred}^i - \overline{y_{pred}})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{obs}^i - \overline{y_{obs}})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{pred}^i - \overline{y_{pred}})^2}}$$

Équation 3

Où n est le nombre d'échantillons, y_{obs} les températures de l'eau observées et y_{pred} les températures prédites par les modèles.

3 Projection de la température de l'eau de la Seine

Le jeu de projections DRIAS-2020 (DRIAS, 2020 ; Ouzeau et al., 2014) a été élaboré et mis à disposition par Météo-France avec l'appui du Cerfacs et de l'IPSL, et avec le soutien financier du ministère de la Transition écologique. L'évolution des émissions des gaz à effet de serre (GES) dépend des activités anthropiques et des choix politiques futurs. Ceux-ci sont pris en compte à travers les scénarios d'émissions RCP - *Representative Concentration Pathways* (Figure 5).

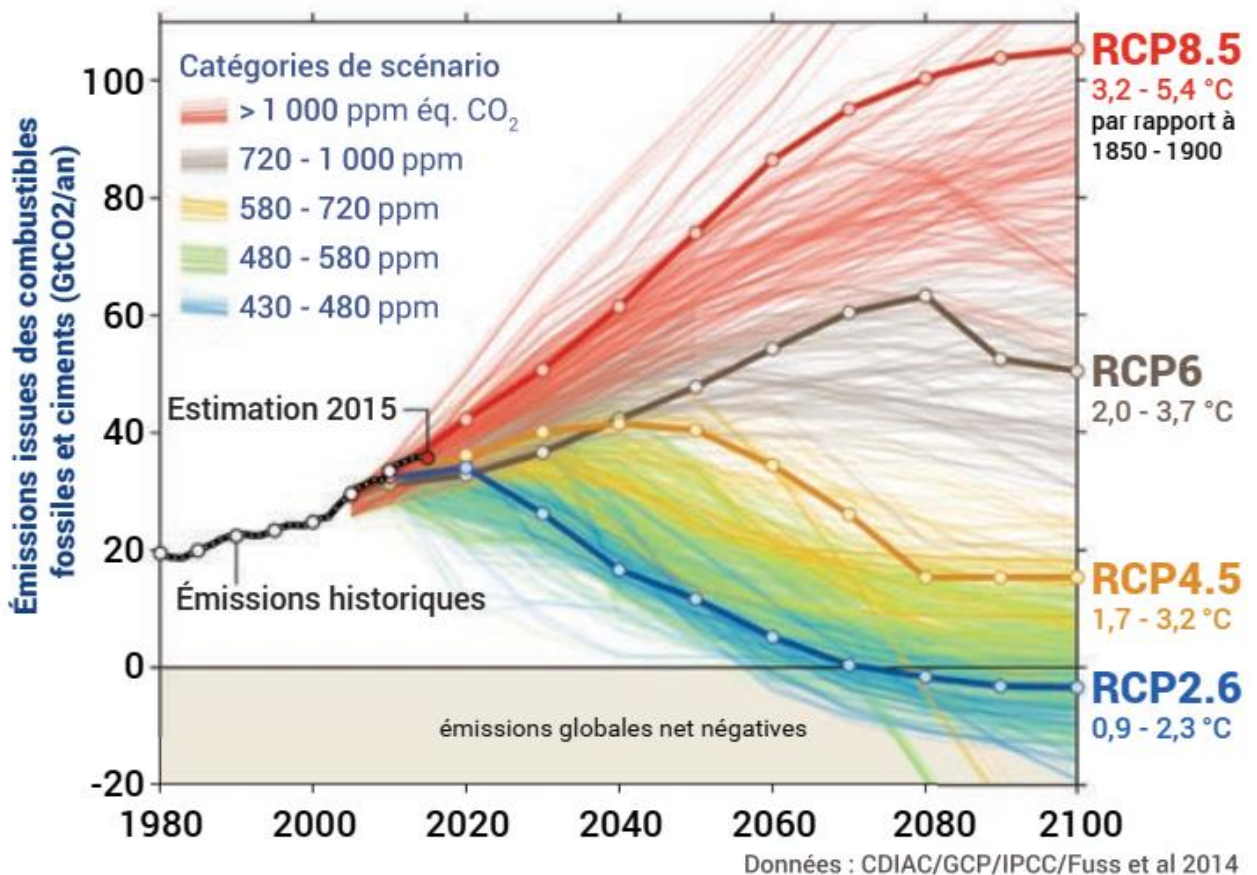


Figure 5 : Évolution des émissions entre 1980 et 2100, selon les différents scénarios disponibles. Les quatre scénarios sélectionnés dans le cadre du cinquième rapport du GIEC (RCP) sont mis en évidence. Source : Global Carbon Project.

Les différents scénarios donnent des températures très différentes (Figure 6). Le jeu de projections DRIAS se compose de 30 simulations couvrant les trois scénarios climatiques. Ces différents RCP sont classés, nommés en termes de forçage radiatif, c'est-à-dire en fonction des résultats du bilan radiatif global de la planète pour différents scénarios d'émissions de GES et d'aérosols.

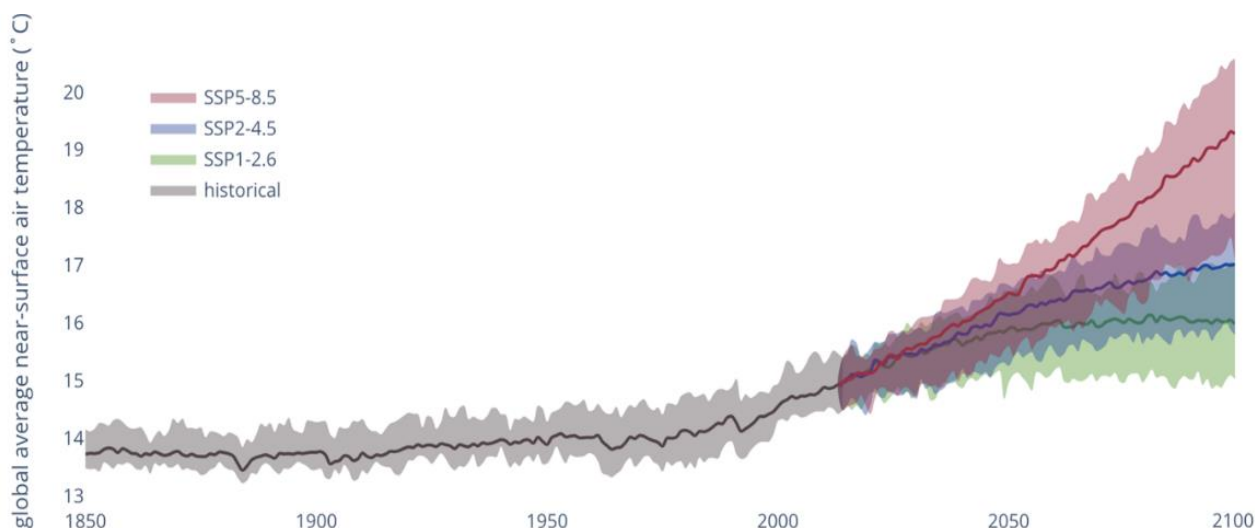


Figure 6 : Évolutions des températures entre 1950 et 2100, selon les différents scénarios disponibles. D'après Climate Model Intercomparison (CPMI version 6). Source : Copernicus 04/2021.

Trois profils ont été établis, avec des forçages radiatifs de 2,6, 4,5 et 8,5. Ces différents scénarios correspondent à une hausse de la température moyenne de la surface du globe différente : 0,3 °C à 1,7 °C (RCP 2.6), 1,1 °C à 2,6 °C (RCP 4.5), et 2,6 °C à 4,8 °C (RCP 8.5). La hausse de température est plus forte l'été dans les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 avec respectivement +2,2 °C et +4,5 °C en valeur médiane et jusqu'à +3,3 °C et +6 °C dans l'enveloppe haute de la distribution (DRIAS, 2020).

Grâce au modèle LASSO, des projections sur la période 2021-2100 ont été réalisées en utilisant les données et projections climatiques disponibles sur DRIAS 2020 (DRIAS, 2020). Les données DRIAS sont extraites de l'Euro-Cordex couvrant trois scénarios climatiques RCP2.6, RCP4.5 et RCP 8.5. Les différents modèles sont décrits dans le Tableau .

Tableau 3 : Liste des différents modèles climatiques utilisés (DRIAS, 2020)

Nom de la simulation	Institution	GCM	RCM	Scénarios
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CNRM-ALADIN63	CNRM	CNRM-CM5	ALADIN63	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6
MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMcom-CCLM4-8-17	CLMcom	MPI-ESM	CCLM4-8-17	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6
MOHC-HadGEM2-ES_ICTP-RegCM4-6	ICTP	HadGEM2	RegCM4-6	RCP8.5, — , RCP2.6
ICHEC-EC-EARTH_SMHI-RCA4	SMHI	EC-EARTH	RCA4	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6
IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-WRF381P	IPSL	IPSL-CM5A	WRF381P	RCP8.5, RCP4.5, —
NCC-NorESM1-M_GERICS-REMO2015	GERICS	Nor-ESM1	REMO2015	RCP8.5, — , RCP2.6
MPI-M-MPI-ESM-LR_MPI-CSC-REMO2009	CSC	MPI-ESM	REMO2009	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6
MOHC-HadGEM2-ES_CLMcom-CCLM4-8-17	CLMcom	HadGEM2	CCLM4-8-17	RCP8.5, RCP4.5, —
ICHEC-EC-EARTH_KNMI-RACMO22E	KNMI	EC-EARTH	RACMO22E	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6
IPSL-IPSL-CM5A-MR_SMHI-RCA4	SMHI	IPSL-CM5A	RCA4	RCP8.5, RCP4.5, —
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_KNMI-RACMO22E	KNMI	CNRM-CM5	RACMO22E	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6
NCC-NorESM1-M_DMI-HIRHAM5	DMI	Nor-ESM1	HIRHAM5 v3	RCP8.5, RCP4.5, —

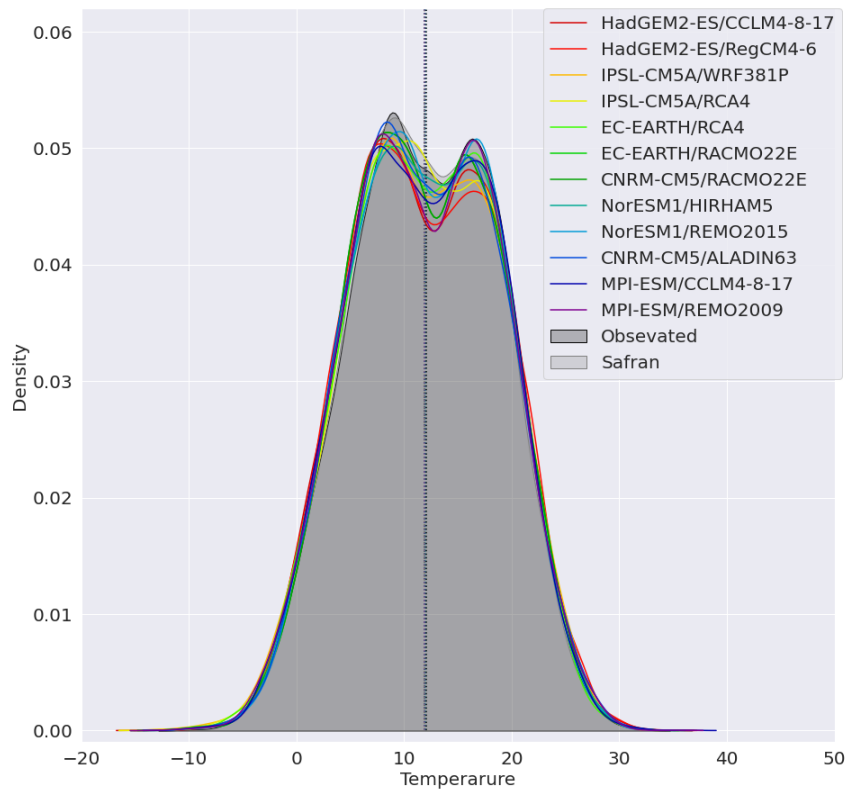


Figure 7 : Comparaison des densités de température de l'air entre les modèles climatiques, les données observées à la station d'Orly et les données SAFRAN sur la période de 1970 à 2020

La Figure 7 représente la distribution des températures de l'air pour les différents modèles climatiques. Les distributions sont très proches les unes des autres. Les données de températures d'air pour entrainer et valider les modèles sont les données de la base de données SAFRAN.

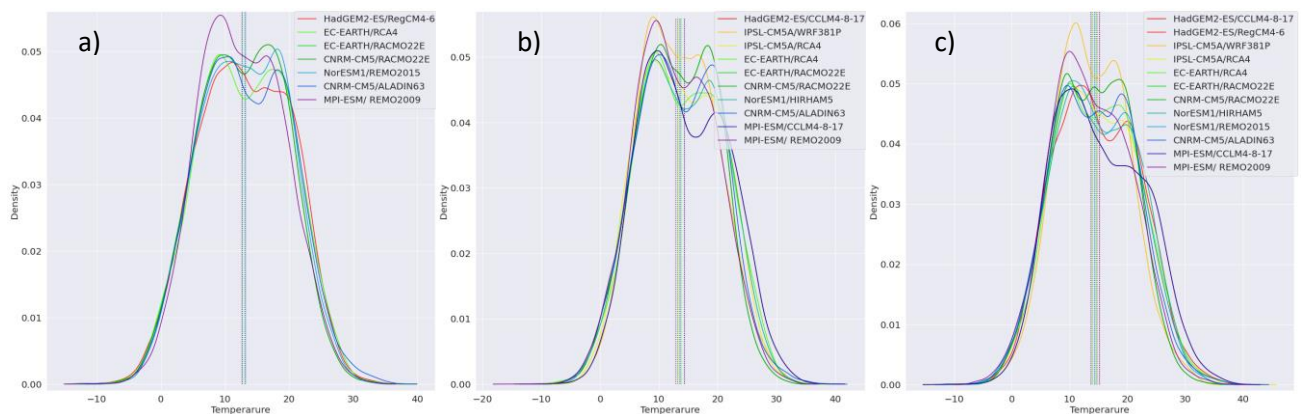


Figure 8 : Comparaison des densités de température de l'air entre les modèles climatiques pour la projection 2020 à 2100 pour les trois scénarios : a) RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5

La Figure 8 représente la distribution des températures de l'air pour les différents RCP. Chaque modèle climatique présente une distribution de température de l'air différente malgré une moyenne très proche. Ceci est important pour la suite de notre étude et explique les différences que l'on obtient dans nos projections de la température de l'eau.

4 Résultats et discussions

4.1 Choix des variables explicatives (*features*)

Les principales variables explicatives les plus importantes sont les mêmes pour toutes les stations. Elles dérivent toutes des moyennes et médianes glissantes de la température journalière moyenne, minimale et maximale de l'air. Les autres variables ont obtenu des importances inférieures à 0.0001. Nous détaillerons seulement les variables explicatives de la Seine à Paris, car les résultats sont très proches. La médiane glissante calculée sur une fenêtre de 15 jours précédant le jour de la prédiction est le prédicteur avec le plus de poids à la hauteur de 15 %. Il en va de même pour les moyennes glissantes calculées sur des fenêtres de 15, 10 et 30 jours, avec des importances respectives de 10 %, 8 % et 2 %. Les médianes classiques apportent elles aussi une amélioration des projections, avec 6 % d'importance avec une fenêtre de 10 jours et 5 % avec une de 15. En effet, la température de l'air doit rester supérieure à celle de l'eau pendant une période suffisamment longue pour induire un réchauffement de celle-ci. Le nombre de jours consécutifs où la température de l'air a été inférieure à 14 °C a un impact sur la projection avec 1 % d'importance. Les minima et maxima journaliers de la température de l'air influencent également la température de l'eau, particulièrement ceux du jour précédent, et leur prise en compte améliore aussi les projections. Les nouveaux prédicteurs, basés sur la multiplication ou la division de prédicteurs importants, ont permis de leur donner plus de poids dans le modèle. En effet, la multiplication des moyennes glissantes sous 10 et 15 jours a une importance de 12 %, semblablement au quotient de la médiane sous 15 jours et du maximum atteint par la température de l'air le jour précédant la projection. Cela fait de ces deux prédicteurs les deuxièmes plus importants dans le modèle.

Les différentes décompositions réalisées avec la transformée de Fourier et les ondelettes de la température moyenne journalière de l'air ont nettement amélioré les prévisions. Les transformées de Fourier, partie cosinus et sinus, nous donnent accès à la décomposition en fréquence, améliorant le modèle via la mise en évidence de comportements saisonniers. La partie cosinus prend une importance de 1 % dans le modèle. Le signal sera aussi décomposé en échelle de temps, la huitième décomposition ayant été retenue comme celle ayant le plus d'importance dans la prédiction avec 3 %.

4.2 Choix du modèle

Une fois les paramètres des différents modèles (linéaire, polynomial, LASSO, *ridge* et *random forest*) optimisés pour chaque station, les performances de modélisation ont été évaluées sur les périodes de validation en utilisant les valeurs RMSE, MAE, R et l'erreur maximale (Tableau 4). Les différents coefficients de déterminations r n'auront pas été pris en compte pour le choix du modèle, car étant tous plus ou moins égaux à 0,99. Les modèles développés ont été capables de prédire avec succès la température de l'eau en utilisant la température de l'air déclinée en différentes variables.

Les différences entre les modèles restent faibles, néanmoins, les modèles Lasso possèdent les MAE et RMSE et l'erreur maximum les plus faibles. Le modèle linéaire est quant à lui le plus mauvais des modèles et ne permet pas de reproduire les valeurs extrêmes.

Tableau 4 : Critères statistiques des meilleurs modèles

Rivière	Station	Modèle	RMSE	MAE	Erreur max
Seine	Bougival	Linéaire	0,94 °C	0,78 °C	3,5 °C
	Paris		0,85 °C	0,69 °C	3,5 °C
	Choisy-le-Roi		0,98 °C	0,74 °C	3 °C
Marne	Neuilly-sur-Marne		1,13 °C	0,83 °C	3,2 °C
Seine	Bougival	Polynomial	0,74 °C	0,58 °C	2,61 °C
	Paris		0,65 °C	0,49 °C	3,09 °C
	Choisy-le-roi		0,68 °C	0,54 °C	2,53 °C
Marne	Neuilly-sur-Marne		0,8 °C	0,63 °C	2,80 °C
Seine	Bougival	Ridge $\alpha=0.1$	0,73 °C	0,59 °C	2,61 °C
	Paris	Ridge $\alpha=3$	0,65 °C	0,46 °C	3,06 °C
	Choisy-le-roi	Ridge $\alpha=0.01$	0,68 °C	0,54 °C	2,53 °C
Marne	Neuilly-sur-Marne	Ridge $\alpha=0.01$	0,80 °C	0,63 °C	2,80 °C
Seine	Bougival	Lasso $\alpha=0.0001$	0,73 °C	0,58 °C	2,55 °C
	Paris	Lasso $\alpha=0,01$	0,63 °C	0,49 °C	2,48 °C
	Choisy-le-Roi	Lasso $\alpha=0,003$	0,66 °C	0,52 °C	2,47 °C
Marne	Neuilly-sur-Marne	Lasso $\alpha=0,005$	0,64 °C	0,49 °C	2,79 °C
Seine	Bougival	Random Forest	0,77 °C	0,62 °C	3,01 °C
	Paris		0,69 °C	0,53 °C	2,93 °C
	Choisy-le-Roi		0,73 °C	0,58 °C	2,79 °C
Marne	Neuill- sur-Marne		0,65 °C	0,53 °C	1,97 °C

5 Projections climatiques de la température de l'eau de 2020 à 2100

5.1 Projections de la température annuelle de 2020 à 2100

Les résultats de toutes les projections de la température de l'eau de la Seine à Paris ont été regroupés sur la Figure 9. Les figures (a), (b) et (c) représentent les moyennes des projections pour chaque scénario climatique (RSP2.6, RCP 4.5 et RCP8.5). Les enveloppes représentent l'intervalle entre la température prédite la plus élevée et la température la moins élevée. Cet intervalle rend compte des différences de températures obtenues avec les différents modèles climatiques. Pour les projections obtenues avec le RCP 2.6, on observe pour l'eau une certaine stabilisation des températures actuelles dans les projections à long terme, alors que le scénario de RCP 4.5 reste dans la continuité des observations actuelles, avec une légère hausse au fil du temps. Dans tous les cas, l'évolution des températures futures présentées sur la Figure 9 est marquée par une augmentation de la température de l'eau. Les projections faites pour le scénario 2.6 ne seront pas retenues et étudiées, car cette perspective ne serait pas réaliste au vu de la situation actuelle.

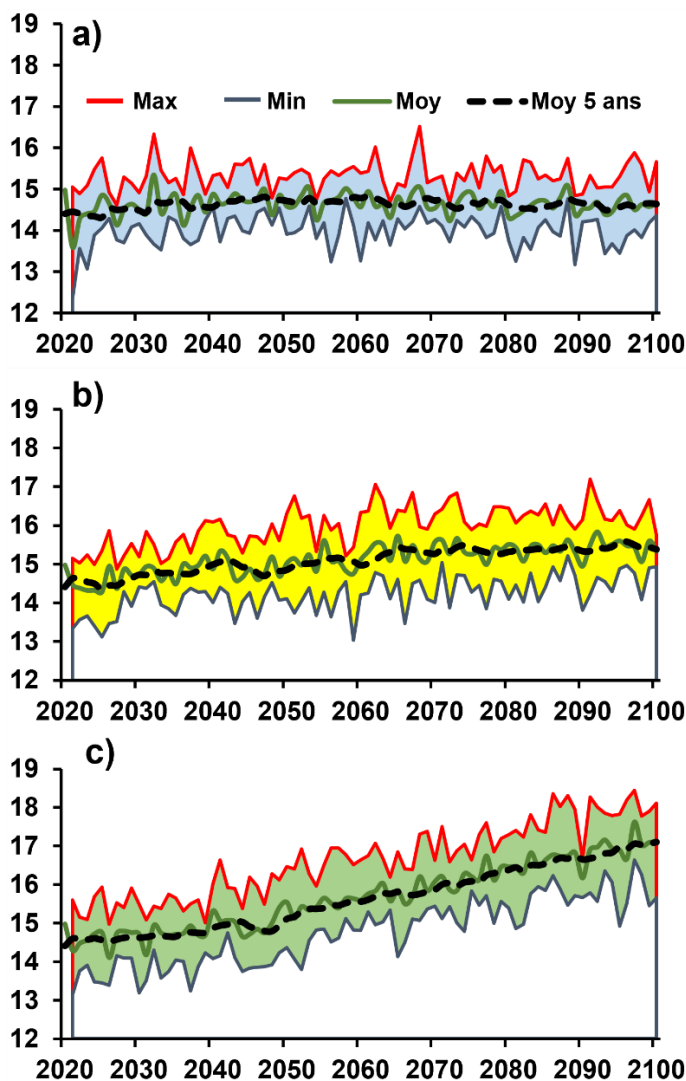


Figure 9 : Résultats des projections de la température de la Seine pour tous les scénarios climatiques présentés dans le Tableau , (a) projections réalisées avec le scénario RCP 2.6, (b) projections réalisées avec le scénario RCP 4.5, (c) projections réalisées avec le scénario RCP 8.5.

Les figures 12 et 12 présentent l'évolution annuelle des températures de l'eau pour les quatre stations. Le Tableau 5 regroupe les températures moyennes des projections de la température de l'eau pour les 4 stations et les 3 scénarios RCP. Ces estimations découlent de la moyenne des projections réalisées avec les 30 scénarios climatiques. Les trois stations de la Seine ont une évolution très similaire avec des températures de l'eau légèrement plus réactives aux variations de la température de l'air pour la station située à Choisy-le-Roi, c'est-à-dire que la température diminue ou augmente plus rapidement que pour les autres stations. Ceci est lié à sa position dans le bassin, cette station étant située en amont de Paris. La Marne est plus fraîche que la Seine dans les données historiques, et reste plus fraîche dans les projections avec le scénario RCP 4.5. Dans les projections réalisées avec le scénario RCP 8.5, la température de la Marne devient plus forte que celle de la Seine à partir de 2060. Des analyses plus poussées doivent être réalisées pour comprendre ce résultat.

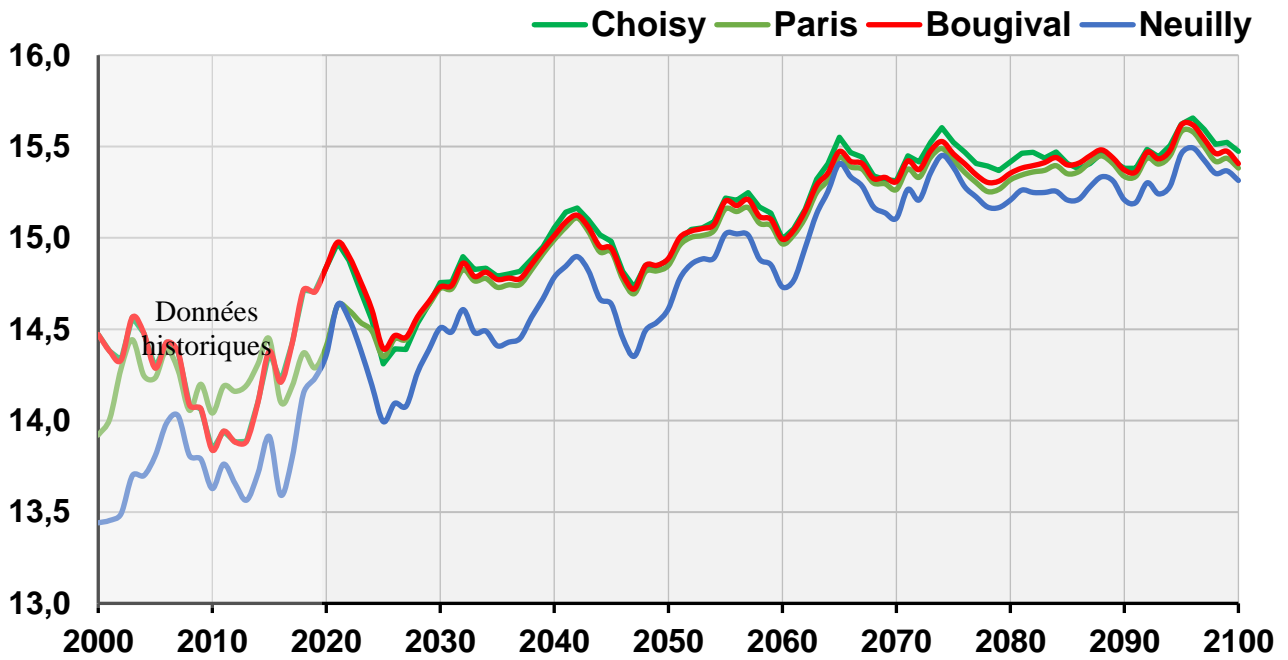


Figure 12 : Comparaison des projections de la température de l'eau pour les quatre stations pour le scénario 4.5 : Choisy : la Seine à Choisy-le-Roi, Paris : la Seine à Paris, Bougival : la Seine à Bougival et Neuilly : la Marne à Neuilly-sur-Marne

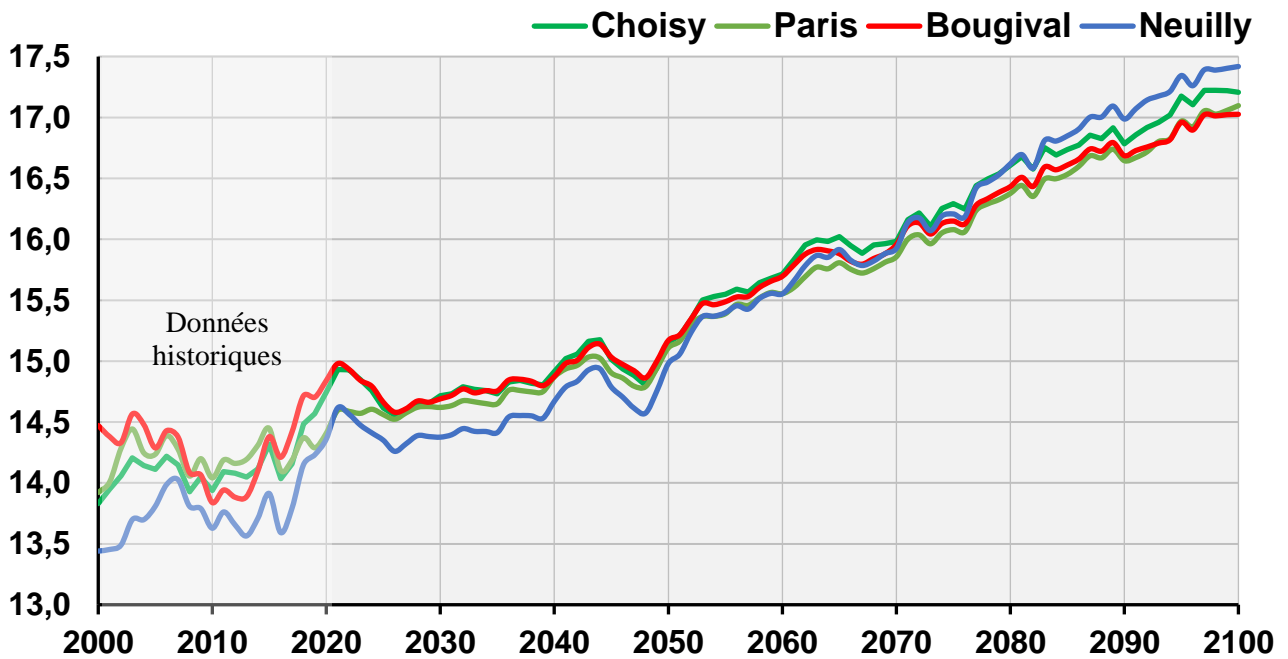


Figure 10 : Comparaison des projections de la température de l'eau pour les quatre stations pour le scénario 8.5 : Choisy : la Seine à Choisy-le-Roi, Paris : la Seine à Paris, Bougival : la Seine à Bougival et Neuilly : la Marne à Neuilly-sur-Marne

Tableau 5 : Température moyenne sur 5 ans pour quatre horizons :

Horizons	Rivière	Station	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 8,5
H0 (2020)	Seine	Bougival	14,8	14,8	14,8
		Paris	14,4	14,4	14,4
		Choisy-le-roi	14,8	14,8	14,8
	Marne	Neuilly-sur-Marne	14,4	14,4	14,4
H1 (2050)	Seine	Bougival	14,6	14,9	15,2
		Paris	14,7	14,8	15,1
		Choisy-le-roi	14,6	14,6	15,0
	Marne	Neuilly-sur-Marne	14,8	14,9	15,2
H2 (2070)	Seine	Bougival	14,7	15,3	16,0
		Paris	14,7	15,3	15,9
		Choisy-le-roi	14,7	15,3	16,0
	Marne	Neuilly-sur-Marne	14,6	15,1	15,9
H3 (2100)	Seine	Bougival	14,8	15,4	17,0
		Paris	14,6	15,4	17,1
		Choisy-le-roi	14,7	15,5	17,2
	Marne	Neuilly-sur-Marne	14,4	15,3	17,4

5.2 Évolution du régime thermique de la Seine

L'évolution des régimes annuels de températures pour la Seine depuis 1870 est représentée sur la Figure 11 où on observe globalement une forte hausse de la température. Dans le cas du scénario RCP4.5, les projections prévoient une certaine constance des régimes de températures à partir de l'horizon 2080, ce qui n'arrive pas dans le cas du scénario RCP 8.5. En effet, pour l'horizon 2100, la moyenne annuelle tend vers les 17 °C, pour le scénario RCP 8.5, impliquant une hausse maximale des moyennes annuelles des températures de plus de 2,5 °C pour la Seine d'ici 2100. Cependant, les observations montrent que les saisons les plus impactées sont et resteront l'hiver et l'été. Les hivers sont plus doux et les étés plus chauds. Ce phénomène persiste dans les différentes projections, mais reste le plus visible pour les scénarios avec un forçage radiatif élevé. En effet, au printemps, les projections sont quasiment superposées, notamment pour le scénario RCP 4.5. Dans le cas de l'automne, une légère hausse est observée pour les deux scénarios. Cependant, au vu de l'augmentation déjà constatée entre les périodes 1870-1901 et 1995-2020, avec une hausse d'environ 2 °C, c'est le scénario de RCP 8.5 qui respecte le mieux cette continuité.

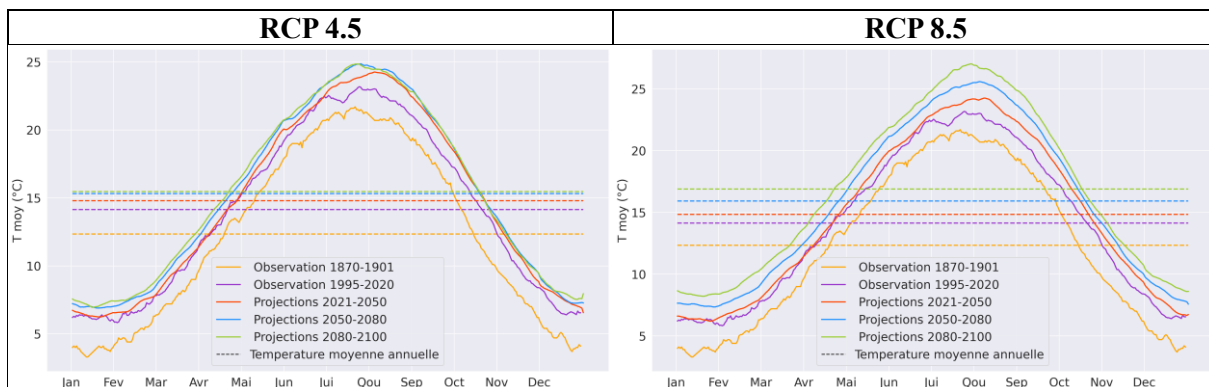


Figure 11 : Projections des régimes thermiques annuels de la Seine pour les différents scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5

5.3 Évolution du nombre de jours froids et chauds des différentes projections

L'étude quantitative du nombre de jours qualifiés de chauds et de froids, en fonction des différents paliers de températures choisies, confirme les observations réalisées sur les données historiques dans le chapitre 1. Les résultats présentés sur les figures 15 et 16 sont ceux obtenus sur la moyenne des différentes projections de la température de l'eau. Le RCP4.5 comporte 10 projections et le RCP8.5 inclut 12 projections. Le nombre de jours est cumulé par décennie. Nous observons une diminution drastique des jours où $T_{eau} \leq 5^\circ\text{C}$ ainsi qu'une augmentation du nombre de jours où $T_{eau} > 27^\circ\text{C}$, et ce peu importe le forçage radiatif du scénario climatique utilisé. Les températures sont inférieures à 5°C jusqu'à présent. Dans le futur, les températures inférieures à 5°C disparaissent et les températures les plus basses sont comprises entre 5°C et 7°C , les températures inférieures à 3°C n'existeront plus du tout.

La différence entre les scénarios 4.5 et 8.5 est particulièrement marquée pour les décennies de 2050 à 2070, et s'accroît pour les décennies 2080 et 2100. D'ici l'année 2100, nous pouvons donc nous attendre à voir peu à peu disparaître la quantité de jours où la température de l'eau sera inférieure ou égale à 7°C , jusqu'à disparition complète, pour le scénario RCP 8.5 pour la décennie 2090-2100. La conséquence sera inversée pour les températures élevées, où une prédominance va s'installer, comme on les constate sur les figures 15 et 16. Jusqu'à présent, la température de la Seine et la température de la Marne ne connaissent que très peu des températures telles que $T_{eau} > 27^\circ\text{C}$. Pour le scénario RCP 8.5, la quantité de jours où la température de la Seine dépassera les 27°C se verra multipliée d'ici 2100.

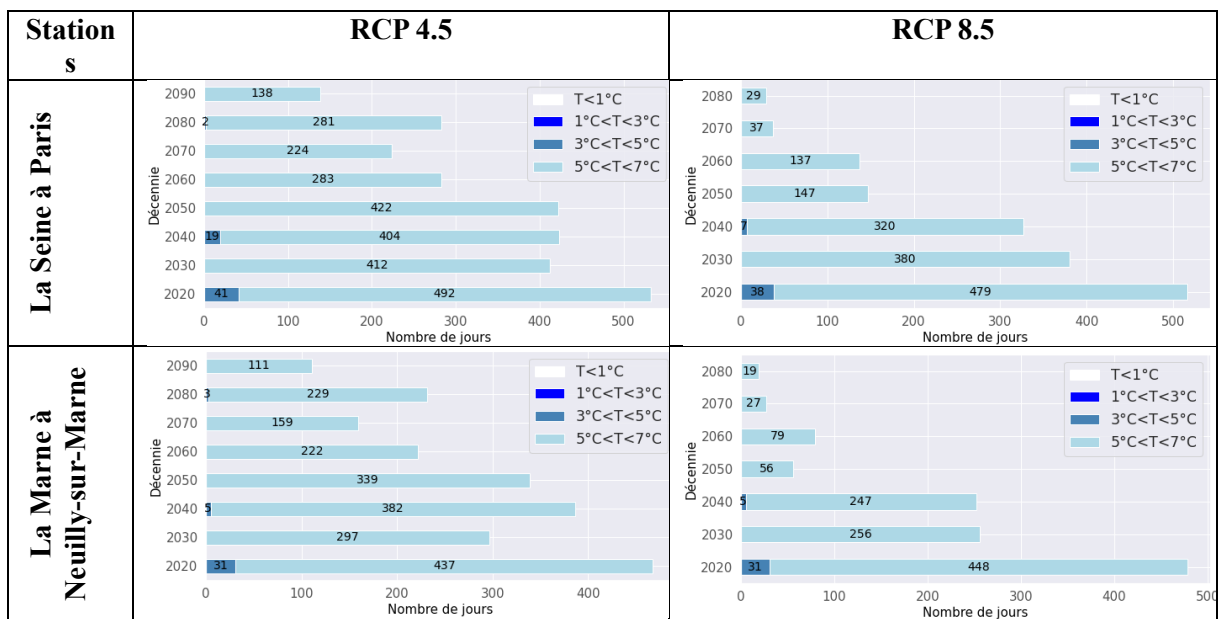


Figure 12 : Nombre de jours froids par décennie jusqu'en 2100 pour les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

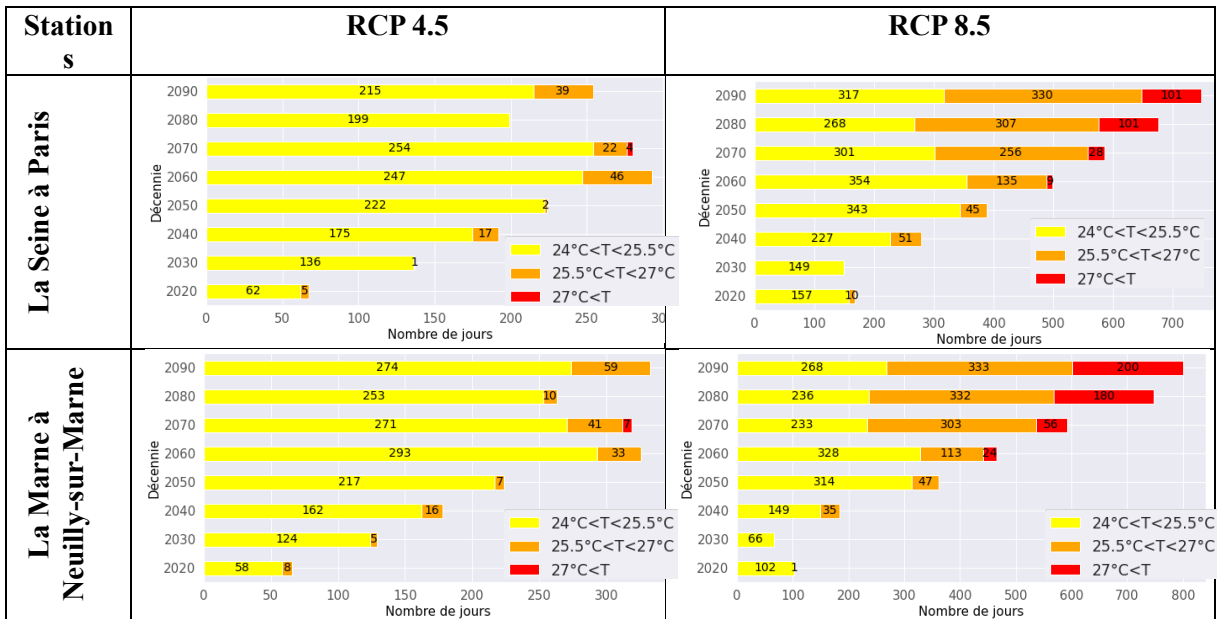


Figure 13 : Nombre de jour chaud par décennie jusqu'en 2100 pour les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

L'apparition régulière des températures extrêmes, $T_{eau} > 27^{\circ}\text{C}$ est confirmée par le diagramme par la Figure 13, pour les deux scénarii. La quantité de jours où $24^{\circ}\text{C} < T_{eau} < 25.5^{\circ}\text{C}$ se stabilise à partir de 2050, entre 200 et 300 jours par décennie pour le scénario RCP4.5 et entre 250 et 350 pour le scénario RCP8.5. Les différences seront notables pour des températures supérieures à 25.5°C , où la quantité de jours concernés sera de plus en plus importante. Les gammes de températures utilisées n'ont pas été choisies au hasard. En effet, comme il en a été discuté dans la partie 1, des arrêtés réglementent l'utilisation de l'eau. L'arrêté ministériel du 2 février 1998 stipule que l'eau dont la température dépasse les 25°C ne peut être utilisée pour de la production d'eau alimentaire. Si d'ici l'année 2100, le réchauffement climatique suit le scénario RCP 8.5, la température de l'eau pourrait s'avérer très problématique quant à l'utilisation de l'eau dans un cadre alimentaire au vu de l'augmentation croissante du nombre de jours où $T_{eau} > 25.5^{\circ}\text{C}$. Le secteur de la production d'énergie sera lui aussi fortement touché par le réchauffement des rivières (Calmets et Corompt, 1972 ; Hartmann et al., 2013). Par exemple, lors de l'été 2020, et selon la RGN, un des réacteurs de la centrale nucléaire de Golfech a été arrêté le 31 juillet pendant plusieurs jours, à la suite de l'évolution de la température des eaux de la Garonne qui était montée à 27.5°C (Crampon, 2020). Or le seuil d'autorisation d'exploitation de la centrale stipule que la température de l'eau utilisée doit être inférieure à 28°C , sous peine d'arrêt de la production. Concernant les écosystèmes, et notamment les poissons, une telle hausse des températures pourrait avoir des conséquences catastrophiques d'ici 2100 sur la qualité de l'eau, par exemple la modification des cycles biogéochimique (Berounsky et Nixon, 1990; Wang et al., 2019) ou la production de biofilm (Bouletreau et al., 2012 ; Maki and Mitchell, 1989). De manière globale, la hausse des températures va directement impacter les différentes espèces piscicoles tout au long de leur développement ainsi que pendant leur phase de reproduction (Isaak et al., 2012 ; Jonsson et Jonsson, 2017; Payne et al., 2016; Sallam et Elsayed, 2015; Salmaso et al., 2017 ; Sinokrot et al., 1995). Les gammes de températures maximales des espèces majoritaires de l'Europe de l'Ouest sont listées dans la Figure 14. Par exemple, dans la phase embryonnaire, des espèces telles que le hotu, le brochet ou la perche ont une limite supérieure respective de leurs zones de résistance de 20°C , 23°C et 21°C (Tissot and Souchon, 2010). Il en va de même pour les températures maximales permettant la reproduction, qui tournent majoritairement entre 14°C et 25°C . Les températures maximales sont de 14°C pour le hotu et de 15°C pour le brochet et la perche fluviatile. Ces trois espèces sont présentes dans les eaux de la Seine. Au vu des résultats obtenus lors des projections pour la température de l'eau de la Seine, des

conséquences néfastes sur les poissons seront certaines.

	Embryon			Larve			Juvénile			Adulte			Reproduction		Code	Famille	Nom vernaculaire	Nom latin
	Opt. min	Opt. max	MAX	Opt. min	Opt. max	MAX	Opt. min	Opt. max	MAX	Opt. min	Opt. max	MAX	Opt. min	MAX				
BLN							13	15		10	18	27	12	15	ABL	Cyprinidae	ablette	<i>Alburnus alburnus</i>
TOX				14	18					16	25		9	14	BAF	Cyprinidae	barbeau fluviatile	<i>Barbus barbus</i>
HOT	10	17	20	15	25	28	15	25		15	24		8	14	BLN	Cyprinidae	blageon	<i>Telestes souffia</i>
GOU	16	20					7	27		7	30	36	12	17	BOU	Cyprinidae	bouvière	<i>Rhodeus sericeus</i>
CHE	16	24	30	14	25		14	25	30	14	24	30	15	20	BRB	Cyprinidae	brème bordelière	<i>Blicca bjoerkna</i>
VAN	7	15	25	16	25		12	25		10	25	32	7	12	BRE	Cyprinidae	brème commune	<i>Abramis brama</i>
SPI				19	24		12	24		12	24	27	14	21	BRO	Esocidae	brochet	<i>Esox lucius</i>
BAF	16	21		15	19	24	13	24	32	10	24	32	13	20	CHE	Cyprinidae	chevesne	<i>Leuciscus cephalus</i>
BOU										12	30	37	15	21	GAR	Cyprinidae	gardon	<i>Rutilus rutilus</i>
GAR	12	24	26				7	21	30	12	25	31	10	18	GOU	Cyprinidae	goujon	<i>Gobio gobio</i>
ABL	21	27	31							20	30	35	15	28	GRE	Percidae	grémille	<i>Gymnocephalus cernuus</i>
BRE	12	23	28				14	28	34	10	26	35	12	20	HOT	Cyprinidae	hotu	<i>Chondrostoma nasus</i>
BRB										16	25		15	25	PER	Percidae	perche fluviatile	<i>Perca fluviatilis</i>
PER	12	18	21	12	25	34	10	25	32	16	27	33	8	15	PES	Centrarchidae	perche soleil	<i>Lepomis gibbosus</i>
GRE	9	21	24	25	30		7	25	30	15	25	31	6	18	SAN	Percidae	sandre	<i>Stizostedion lucioperca</i>
SAN	12	20	25	14	23	31	27	30	34	27	30	35	6	20	SIL	Siluridae	silure	<i>Silurus glanis</i>
BRO	8	14	23	12	21	28	19	21	31	10	24	31	8	15	SPI	Cyprinidae	spirilin	<i>Alburnoides bipunctatus</i>
PES							13	28	30	12	30	35	13	25	TOX	Cyprinidae	toxostome	<i>Chondrostoma toxostoma</i>
SIL										12	28	32	20	25	VAN	Cyprinidae	vandoise	<i>Leuciscus leuciscus</i>

Figure 14 : Gamme des températures optimales pour chaque espèce de poisson : Opt. Min température minimum optimal, Opt. Max ; température maximale optimal et MAX ; limite supérieure de résistance, et max. Les espèces suivantes ont été recensées dans la Seine : ablette, barbeau fluviatile, bouvière, brème bordelière, brème commune, brochet, chevesne, épinochette, gardon, goujon, grémille, hotu, perche, perche soleil, sandre, silure glane. (Tissot and Souchon, 2010)

Conclusion et perspectives

Lors de cette étude, plusieurs modèles de *machine learning*, basés en grande partie sur les moyennes journalières de la température de l'air ont été développés afin d'obtenir les meilleures prévisions possibles de la température de l'eau des rivières. Les modèles ont pour le moment, uniquement été appliqués à quatre stations situées sur la Seine et la Marne, mais le sera prochainement sur toutes les stations qui ont été étudiées dans les secteurs du

. Pour les stations étudiées, le débit ainsi que les précipitations ne font pas partie des prédicteurs les plus importants, du fait des nombreux barrages se trouvant sur ces axes fluviaux. La température de l'air et ses paramètres dérivés sont donc les plus impactant. Les paramètres climatiques pourraient cependant être très importants dans le cas d'une rivière impactée directement par la fonte des neiges ou dépourvue d'installations hydrauliques (écluses, barrages). De plus, pour les rivières d'ordre de Strahler <4, la température de l'eau des rivières plus petites () est d'impactée par d'autres facteurs comme les radiations solaires, l'ombrage, l'évapotranspiration ou les apports d'eau souterraine (Dugdale et al., 2017). Il serait néanmoins intéressant d'étudier d'autres rivières et d'évaluer l'importance des différents paramètres utilisés pour la prédiction, afin de voir quels sont ceux qui ont le plus d'importance en fonction de différents régimes climatiques, hydrologiques et de la position de la rivière dans le bassin.

Les résultats des différentes projections montrent l'importance de surveiller l'évolution des températures des fleuves. L'utilisation des différents scénarios climatiques a montré une convergence des résultats pour les projections réalisées sur la base d'un modèle pour l'air avec des RCP identiques. De manière journalière, les températures de la Seine ne dépasseront pas les 28-30°C en moyenne. Il est à noter que les températures élevées seront observées de manière plus régulière. D'ici 2100, nous estimons que la quantité de jours, par **décennie**, où la température de l'eau dépassera les **27°C** en moyennes journalières **passera de 0 à 100** dans le scénario RCP 8.5. Les conséquences d'une telle augmentation seront dévastatrices pour l'équilibre des écosystèmes. De même, nous devons nous

attendre à faire face à de plus en plus de problèmes quant à la consommation de l'eau, ainsi qu'à son utilisation notamment dans le secteur de la production d'énergie. L'arrêté du 2 février 1998 stipule que la température de rejets maximaux autorisés est de 28°C avec un écart de température induit de 3°C maximum. D'après les diagrammes de la Figure 13, **la quantité de jours où $T_{\text{eau}} > 25.5^\circ\text{C}$ augmentera de manière croissante dans le temps. Des dérogations devront être mises en place, lorsque cela sera possible, des productions pourraient être arrêtées, comme pour la centrale de Golfech, et les prélèvements d'eau pour un usage alimentaire seront fortement restreints.**

De nombreuses perspectives sont envisagées pour le travail qui a été réalisé lors de cette étude. La température de l'air est reconnue comme un facteur de contrôle de la température de l'eau, et même la principale dans le cas de la Seine au sein de Paris. Des projections étendues sur d'autres rivières du bassin de la Seine, plus ou moins grandes, pourraient mettre en avant le fort impact d'autres paramètres, mais aussi l'homogénéité des résultats en termes de réchauffement. En effet, les observations actuelles, combinées avec projections des scénarios climatiques pointent tous deux dans la direction d'un réchauffement **certain pour l'eau de la Seine**. Les **projections des températures de l'eau** des rivières seront d'une importance capitale pour les secteurs directement dépendants de l'eau afin de pouvoir **anticiper les conséquences du réchauffement climatique**.

Pour retrouver les outils et données

Les codes développés sont en cours de bancarisation sur github.

Bibliographie

- Adamowski, J., Chan, H.F., 2011. A wavelet neural network conjunction model for groundwater level forecasting. *J. Hydrol.* 407, 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.013>
- Allen, and Barros, Vicente Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., Dubash, N., Edenhofer, O., Elgizouli, I., Field, C., Forster, P., Friedlingstein, Pierre Fuglestvedt, J., Gomez-Echeverri, L., Hallegatte, S., Hegerl, G., Urge-Vorsatz, D., 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*.
- Bates, B.C., Kundzewics, Z.W., Wu, S., J Palutikof, P., 2008. *Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Rapp. GIEC Éd 2008 236.*
- Beaufort, A., Moatar, F., Curie, F., Ducharne, A., Bustillo, V., Thiéry, D., 2016. River Temperature Modelling by Strahler Order at the Regional Scale in the Loire River Basin, France. *River Res. Appl.* 32, 597–609. <https://doi.org/10.1002/rra.2888>

- Berounsky, V., Nixon, S.W., 1990. Temperature and the annual cycle of nitrification in waters of Narragansett Bay. *Limnol Ocean.* 35, 1610–1617.
- Bouletreau, S., Salvo, E., Lyautey, E., Mastrorillo, S., 2012. Temperature dependence of denitrification in phototrophic river biofilms. *Sci. Total Environ.* 416, 323–328. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.066>
- Buitinck, L., Louppe, G., Blondel, M., Pedregosa, F., Mueller, A., Grisel, O., Niculae, V., Prettenhofer, P., Gramfort, A., Grobler, J., Layton, R., VanderPlas, J., Joly, A., Holt, B., Varoquaux, G., 2013. {API} design for machine learning software: experiences from the scikit-learn project, in: ECML PKDD Workshop: Languages for Data Mining and Machine Learning. pp. 108–122.
- Caissie, D., 2006. The thermal regime of rivers: a review. *Freshw. Biol.* 51, 1389–1406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>
- Calmets, P., Corompt, P., 1972. Détermination de la distribution des temps de séjour de la {S}eine entre le pont de Poissy et le barrage de Méricourt (Essais de mai à octobre 1972). Etude dans le cadre de la pollution thermique.
- Comer-Warner, S.A., Romeijn, P., Goody, D.C., Ullah, S., Kettridge, N., Marchant, B., Hannah, D.M., Krause, S., 2018. Thermal sensitivity of CO₂ and CH₄ emissions varies with streambed sediment properties. *Nat. Commun.* 9. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04756-x>
- Crampon, C., 2020. EN DIRECT 18.08.2020, Canicule 2020, quel impact sur les centrales nucléaires françaises et les autres énergies ? *Rev. Générale Nucl. SFEN L'INFORMATION Réf. SUR L'ÉNERGIE Nucl.* <https://climate.copernicus.eu/index.php/latest-projections-future-climate-now-available>
- Dallas, H.F., Rivers-Moore, N.A., 2012. Critical Thermal Maxima of aquatic macroinvertebrates: towards identifying bioindicators of thermal alteration. *Hydrobiologia* 679, 61–76. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0856-4>
- Dallas, H.F., Ross-Gillespie, V., 2015. Sublethal effects of temperature on freshwater organisms, with special reference to aquatic insects. *Water SA* 41, 712–726.
- DREAL Pays de la Loire, 2016. Température des cours d'eau sur le périmètre de la cellule de qualité des eaux. Collection Analyses et connaissance.
- DRIAS, 2020. LES NOUVELLES PROJECTIONS CLIMATIQUES DE RÉFÉRENCE DRIAS 2020 POUR LA MÉTROPOLE.
- Ducharne, A., 2008. Importance of stream temperature to climate change impact on water quality. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12, 797–810. <https://doi.org/10.5194/hess-12-797-2008>
- Dugdale, Stephen J., Hannah, D.M., Malcolm, I.A., 2017. River temperature modelling: A review of process-based approaches and future directions. *Earth-Sci. Rev.* 175, 97–113. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.10.009>
- Dugdale, S.J., Hannah, D.M., Malcolm, I.A., 2017. River temperature modelling: A review of process-based approaches and future directions. *Earth-Sci. Rev.* 175, 97–113. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.10.009>
- Ficklin, D.L., Stewart, I.T., Maurer, E.P., 2013. Effects of climate change on stream temperature, dissolved oxygen, and sediment concentration in the Sierra Nevada in California. *Water Resour. Res.* 49, 2765–2782. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20248>
- Fullerton, A.H., Torgersen, C.E., Lawler, J.J., Steel, E.A., Ebersole, J.L., Lee, S.Y., 2017. Longitudinal

- thermal heterogeneity in rivers and refugia for coldwater species: effects of scale and climate change. *Aquat. Sci.* 80, 3. <https://doi.org/10.1007/s00027-017-0557-9>
- Graf, R., Zhu, S., Sivakumar, B., 2019. Forecasting river water temperature time series using a wavelet–neural network hybrid modelling approach. *J. Hydrol.* 578, 124115. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124115>
- Hartmann, P., Bordet, F., Chevalier, C., Colin, J., Michel, K., 2013. Centrales nucléaires et environnement, Prélèvements d'eau et rejets. Guide Inf.
- Ibrahim, M., Jemei, S., Wimmer, G., Steiner, N.Y., Kokonendji, C.C., Hissel, D., 2015. Selection of mother wavelet and decomposition level for energy management in electrical vehicles including a fuel cell. *Int. J. Hydrog. Energy* 40, 15823–15833. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.055>
- IPCC, 2018. Global Warming of 1.5° C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5° C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Isaak, D.J., Luce, C.H., Rieman, B.E., Nagel, D.E., Peterson, E.E., Horan, D.L., Parkes, S., Chandler, G.L., 2010. Effects of climate change and wildfire on stream temperatures and salmonid thermal habitat in a mountain river network. *Ecol. Appl.* 1350–1371. <https://doi.org/10.1890/09-0822.1>
- Isaak, D.J., Wollrab, S., Horan, D., Chandler, G., 2012. Climate change effects on stream and river temperatures across the northwest U.S. from 1980–2009 and implications for salmonid fishes. *Clim. Change* 113, 499–524. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0326-z>
- Jensen, M.J., 2000. An alternative maximum likelihood estimator of long memory processes using compactly supported wavelets. *J Econ Dyn Control* 24, 361–387.
- Jonsson, B., Jonsson, N., 2017. Fecundity and water flow influence the dynamics of Atlantic salmon. *Ecol. Freshw. Fish* 26, 497–502. <https://doi.org/10.1111/eff.12294>
- Maheu, A., St-Hilaire, A., Caissie, D., El-Jabi, N., 2016. Understanding the Thermal Regime of Rivers Influenced by Small and Medium Size Dams in Eastern Canada. *River Res. Appl.* 32, 2032–2044. <https://doi.org/10.1002/rra.3046>
- Maki, J.S., Mitchell, R., 1989. L'adhésion microbienne aux surfaces et ses conséquences, in : *Micro-Organismes Dans Les Écosystèmes Océaniques*. Masson, pp. 387–409.
- Marmonier, P., Archambaud, G., Belaidi, N., Bougon, N., Breil, P., Chauvet, E., Claret, C., Cornut, J., Datry, T., Dole-Olivier, M.J., Dumont, B., Flipo, N., Foulquier, A., Gérino, M., Guilpart, A., Julien, F., C.Maazouzi, Martin, D., Mermillod-Blondin, F., Montuelle, B., Namour, Ph., Navel, S., Ombredane, D., Pelte, T., Piscart, C., Pusch, M., Stroffek, S., Robertson, A., Sanchez-Pérez, J.M., Sauvage, S., Taleb, A., Wantzen, M., Vervier, Ph., 2012. The role of organisms in hyporheic processes : gaps in current knowledge, needs for future research and applications. *Ann Limnol - Int J Lim* 48, 253–266.
- Marzadri, A., Tonina, D., Bellin, A., 2013. Effects of stream morphodynamics on hyporheic zone thermal regime. *Water Resour. Res.* 49, 2287–2302. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20199>
- Matthews, K.R., Berg, N.H., 1997. Rainbow trout responses to water temperature and dissolved oxygen stress in two southern California stream pools. *J. Fish Biol.* 50, 50–67. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1997.tb01339.x>
- Mohseni, O., Stefan, H.G.G., 1999. Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation. *J. Hydrol.* 218, 128–141. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00034-7)

- Montalvo, C., García-Berrocal, A., 2015. Improving the in situ measurement of RTD response times through Discrete Wavelet Transform in NPP. *Ann. Nucl. Energy* 80, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.02.004>
- Nourani, V., Alami, M.T., Aminfar, M.H., 2009. A combined neural-wavelet model for prediction of Ligvanchai watershed precipitation. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 22, 466–472. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2008.09.003>
- Nourani, V., Kisi, Ö., Komasi, M., 2011. Two hybrid Artificial Intelligence approaches for modeling rainfall–runoff process. *J. Hydrol.* 402, 41–59. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.002>
- Nourani, V., Parhizkar, M., 2013. Conjunction of SOM-based feature extraction method and hybrid wavelet-ANN approach for rainfall–runoff modeling. *J. Hydroinformatics* 15, 829–848. <https://doi.org/10.2166/hydro.2013.141>
- Olden, J.D., Naiman, R.J., 2010. Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshw. Biol.* 55. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02179.x>
- Ouellet, V., St-Hilaire, A., Dugdale, S.J., Hannah, D.M., Krause, S., Proulx-Ouellet, S., 2020. River temperature research and practice: Recent challenges and emerging opportunities for managing thermal habitat conditions in stream ecosystems. *Sci. Total Environ.* 736, 139679. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139679>
- Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., Vautard, R., 2014. Drias, données Météo-France. CERFACS IPSL.
- Pan, W., Huang, Q., Huang, G., Xing, L., 2021. Modeling the effects of temperature on the migration and transformation of nitrate during riverbank filtration using HYDRUS-2D. *Sci. Total Environ.* 783, 146656. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146656>
- Payne, N.L., Smith, J.A., van der Meulen, D.E., Taylor, M.D., Watanabe, Y.Y., Takahashi, A., Marzullo, T.A., Gray, C.A., Cadiou, G., Suthers, I.M., 2016. Temperature dependence of fish performance in the wild: links with species biogeography and physiological thermal tolerance. *Funct. Ecol.* 30, 903–912. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12618>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., Duchesnay, E., 2011. Scikit-learn: Machine Learning in {P}ython. *J. Mach. Learn. Res.* 12, 2825–2830.
- Poole, G.C., Berman, C.H., 2001. An Ecological Perspective on In-Stream Temperature: Natural Heat Dynamics and Mechanisms of Human-Caused Thermal Degradation. *Environ. Manage.* 27, 787–802. <https://doi.org/10.1007/s002670010188>
- Sallam, G.A.H., Elsayed, E.A., 2015. Estimating the impact of air temperature and relative humidity change on the water quality of Lake Manzala, Egypt. *J. Nat. Resour. Dev.* <https://doi.org/10.5027/jnrd.v5i0.11>
- Salmaso, F., Quadroni, S., Gentili, G., Crosa, G., 2017. Thermal regime of a highly regulated Italian River (Ticino River) and implications for aquatic communities. *J. Limnol.* 76, 23–33. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2016.1437>
- Sang, Y.-F., 2012. A Practical Guide to Discrete Wavelet Decomposition of Hydrologic Time Series. *Water Resour. Manag.* 26, 3345–3365. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0075-4>
- Shukla, P.R., Skea, J., Buendia, E.C., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Zhai, P.,

- Slade, R., Connors, S., Diemen, R. van, Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Pereira, J.P., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Malley, M.J., 2019. IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.
- Sinokrot, B.A., Stefan, H.G., McCormick, J.H., Eaton, J.G., 1995. Modeling of climate change effects on stream temperatures and fish habitats below dams and near groundwater inputs. *Clim. Change* 30, 181–200. <https://doi.org/10.1007/BF01091841>
- Stanford, J.A., Boulton, A.J., 1993. Hydrology and the distribution of hyporheos: perspectives from a mesic river and a desert stream. *J. North Am. Benthol. Soc.* 12, 79–83.
- Tissot, L., Souchon, Y., 2010. Synthèse des tolérances thermiques des principales espèces de poissons des rivières et fleuves de plaine de l'ouest européen 17. <https://doi.org/10.1051/hydro/2010004>
- Vega, M., Pardo, R., Barrado, E., Debán, L., 1998. Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis. *Water Res.* 32, 3581–3592. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00138-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00138-9)
- Wang, D., Tse, P.W., Tsui, K.L., 2013. An enhanced Kurtogram method for fault diagnosis of rolling element bearings. *Mech. Syst. Signal Process.* 35, 176–199. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2012.10.003>
- Wang, S., Flipo, N., Romary, T., 2019. Oxygen data assimilation for estimating micro-organism communities' parameters in river systems. *Water Res.* 165, 115021. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115021>
- Webb, B.W., Hannah, D.M., Moore, R.D., Brown, L.E., Nobilis, F., 2008. Recent advances in stream and river temperature research. *Hydrol. Process.* 22, 902–918. <https://doi.org/10.1002/hyp.6994>
- Webb, B.W., Nobilis, F., 2007. Long-term changes in river temperature and the influence of climatic and hydrological factors. *Hydrol. Sci. J.* 52, 74–85. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.1.74>
- Zhang, X., Li, D., 2001. Trou Wavelet Decomposition Applied to Image Edge Detection. *Ann. GIS* 7, 119–123. <https://doi.org/10.1080/10824000109480563>
- Zhu, S., Heddam, S., 2019. Modelling of Maximum Daily Water Temperature for Streams: Optimally Pruned Extreme Learning Machine (OPELM) versus Radial Basis Function Neural Networks (RBFNN). *Environ. Process.* 6, 789–804. <https://doi.org/10.1007/s40710-019-00385-8>
- Zhu, S., Nyarko, E.K., Hadzima-Nyarko, M., 2018. Modelling daily water temperature from air temperature for the Missouri River. *PeerJ* 2018, 1–19. <https://doi.org/10.7717/peerj.4894>
- Zhu, S., Piotrowski, A.P., 2020. River/stream water temperature forecasting using artificial intelligence models: a systematic review. *Acta Geophys.* 1–10.



La phase 8 du PIREN-Seine

Lancée en 2020, la phase 8 du PIREN-Seine s'achève fin 2023.

Structurée par cinq axes de recherche thématiques et un axe de transfert des connaissances et données, elle s'inscrit dans le prolongement des travaux menés par le programme depuis 1989 tout en renouvelant les approches pour répondre aux grands enjeux contemporains.

Les rapports de synthèse, réunis en dix volumes, proposent un bilan des recherches conduites pendant quatre ans grâce au soutien des partenaires institutionnels et scientifiques.

- Volume 1 Scénarios agri-alimentaires et urbains
- Volume 2 Impacts des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau
- Volume 3 Trajectoires hydrologiques passée, présente et futures du bassin de la Seine
- Volume 4 Transferts de chaleur et températures des eaux du bassin de la Seine**
- Volume 5 Métabolisme des eaux du bassin de la Seine au regard de la matière organique
- Volume 6 Petites rivières urbaines
- Volume 7 Interdisciplinarité en Bassée-Voulzie
- Volume 8 Baignade en Seine et en Marne
- Volume 9 Dynamique des contaminants à l'échelle du bassin versant de la Seine
- Volume 10 Processus biophysicochimiques et interactions biote-contaminants à l'échelle locale

Retrouvez tous les
rapports sur
www.piren-seine.fr

