

Étude des données de température de l'eau des rivières

Zoé LOREAU *
INPT-ENM, CNRM, Météo-France,
Toulouse, France.

November 14, 2023

RÉSUMÉ

Cet article donne une analyse des températures de l'eau des rivières en France, cruciales pour la gestion écologique face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques. Elle exploite des données d'observation pour identifier les tendances et liens significatifs. Les étapes impliquent le traitement des données, l'examen des variations saisonnières et temporelles, et la mise en évidence des corrélations entre les températures de l'eau et de l'air. Les résultats révèlent des variations saisonnières caractéristiques et des tendances temporelles diverses, soulignant la complexité des dynamiques thermiques des rivières françaises. Une corrélation significative entre les températures de l'eau et de l'air ouvre des perspectives d'enrichissement des données. Les approches d'acteurs comme EDF ou le projet TIGRE méritent d'être explorées. En définitive, cette étude renforce la compréhension des écosystèmes aquatiques et fournit des éclairages essentiels pour une gestion adaptative en période de changement global.

Mots clés: *température des rivières, hydrologie, changement climatique.*

Introduction

Les rivières revêtent une importance cruciale dans le maintien de l'équilibre environnemental en fournissant de l'eau douce, abritant une biodiversité essentielle et soutenant des écosystèmes vitaux (Caissie (2006)). La surveillance des températures des rivières est impérative pour évaluer la santé de ces écosystèmes aquatiques. Les températures excessivement élevées peuvent causer des dommages en entraînant une mortalité accrue chez certaines espèces de poissons et la prolifération d'algues nuisibles, entraînant ainsi une dégradation de la qualité de l'eau et perturbant l'équilibre écologique des cours d'eau.

De plus, la température de l'eau des rivières a des répercussions socio-économiques significatives (Hannah and Garner (2015)), notamment dans les secteurs de la pêche et de la production d'électricité. Les activités humaines telles que les changements climatiques, l'urbanisation, l'agriculture et les modifications des régimes hydrologiques ont impacté les rivières et ont une influence sur leur température (Beaufort (2015)). Par conséquent, une compréhension approfondie des variations de température des rivières est cruciale pour prendre des décisions éclairées et gérer de manière efficace les précieuses ressources en eau.

Il est à noter qu'actuellement, aucune étude exhaustive des données de température de l'eau des rivières n'a été réalisée à l'échelle nationale en France. Cet article propose ainsi une première approche en se basant sur des données d'observation in situ. L'objectif principal de cette démarche est de développer notre compréhension à moyen terme de l'évolution des températures de l'eau à différentes échelles temporelles. Pour cela, des travaux de

traitement de données sont nécessaires, ainsi qu'une analyse approfondie des tendances et des corrélations, afin de mieux appréhender les variations de ce paramètre au fil du temps.

L'article est structuré de la manière suivante : la section 1 présente les données employées dans cette étude ainsi que leur traitement. La section 2 propose une analyse des variations saisonnières des températures de l'eau. La section 3 se concentre sur l'examen des tendances temporelles d'évolution des températures de l'eau. Dans la section 4, la corrélation entre les températures de l'eau et celles de l'air est examinée. Enfin, la dernière section formule une conclusion et esquisse quelques perspectives à considérer.

1 Récupération et mise en forme des données

J'ai commencé par récupérer les données de température de l'eau et les traiter. C'est une étape très importante afin de construire une base solide pour nos analyses ultérieures.

1.1 Récupération des données

Les données relatives à la température de l'eau ont été extraites de la banque de données des *Naiades*. Collectées à des intervalles semi-horaires, elles proviennent de 756 stations de mesure, dont 730 sont localisées en France métropolitaine. Bien que ces données couvrent la période allant de 2006 à 2022, un grand nombre d'entre elles manquent, conduisant à un taux de remplissage du fichier contenant les données de seulement 16.7% 1. Notre étude va uniquement se porter sur les stations de France métropolitaine.

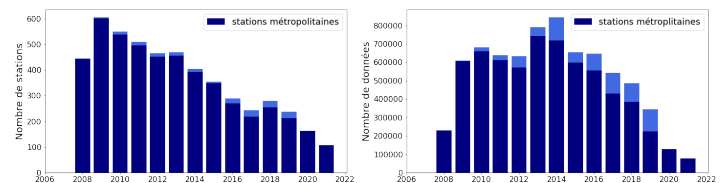


Figure 1: Nombre de stations de mesure par an (gauche) ; nombre de données d'observations par an (droite).

1.2 Traitement des données

Afin de faciliter l'utilisation de ces données, j'ai créé des fichiers au format NetCDF pour les pas de temps horaire, journalier et mensuel. Lors de la première analyse visuelle des données horaires, il est apparu clairement qu'il y avait des valeurs aberrantes (Fig 2). Ces valeurs comprenaient des températures de l'eau dépassant 100°C ou chutant en dessous de -70°C. Le projet TIGRE (Beaufort (2015)), une étude menée en collaboration entre l'INRAE et

*Contact: zoe.loreau@meteo.fr

l'Université de Tours qui vise à analyser les fluctuations de température dans les cours d'eau dans le bassin de la Loire, a permis d'identifier trois principaux types d'anomalies dans les enregistrements de température, comme suit :

- Les anomalies d'enregistrement : elles proviennent d'erreurs lors de la mise en place de la sonde ou de la surveillance de température. On peut retrouver des duplications d'enregistrement ou des pics de température au début de la période de mesure.
- Les anomalies liées à l'exondement de la sonde : elles se caractérisent par une augmentation rapide des amplitudes quotidiennes, pouvant dépasser 7°C. Pour confirmer l'hypothèse d'exondement, ces cas sont comparés aux enregistrements de température de l'air.
- Les anomalies dues à l'enfouissement de la sonde : elles sont plus complexes à identifier. Elles se traduisent par des enregistrements de signaux peu variables, moins fréquents et plus difficiles à détecter.

Pour éliminer ces données erronées, j'ai appliqué un filtrage en utilisant la méthode décrite par [Beaufort et al. \(2020\)](#). Une fois les données filtrées, on a des valeurs beaucoup plus cohérentes et le cycle annuel des températures de l'eau est mis en évidence (Fig 2). Ensuite, j'ai généré des fichiers journaliers et mensuels en moyennant les données horaires filtrées : j'ai considéré une donnée journalière (mensuelle) comme manquante si elle ne repose pas sur au moins 20 mesures horaires sur une journée (journalières sur un mois). En revanche, si le nombre de mesures horaires (journalières) est égal ou supérieur à 20, les données sont moyennées pour obtenir une valeur quotidienne (mensuelle).

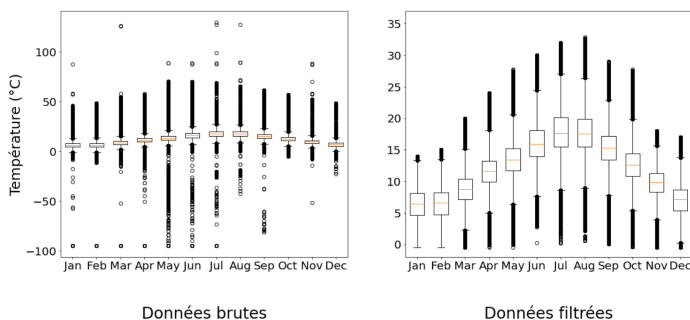


Figure 2: Boîtes à moustaches mensuelles des données de température de l'eau brutes (à gauche) et filtrées (à droite).

2 Variations saisonnières

Pour amorcer l'analyse approfondie de mes données d'observations, j'ai entrepris une étude minutieuse des variations saisonnières qui influencent la température de l'eau. À cette fin, j'ai élaboré la figure 3, une représentation visuelle sous la forme de quatre cartes distinctes. Chacune de ces cartes dépeint les moyennes saisonnières des températures de l'eau pour chaque station au sein de mon réseau d'observation. Cette approche a permis de mettre en lumière les variations potentielles des températures à travers les différentes saisons de l'année.

Les résultats que j'ai obtenus correspondent parfaitement à mes attentes : les températures de l'eau affichent des fluctuations saisonnières tout à fait caractéristiques. Globalement, il est évident que les températures sont plus fraîches pendant l'hiver et connaissent une élévation pendant l'été. Les saisons intermédiaires,

le printemps et l'automne, révèlent des températures relativement similaires, bien que l'automne présente une légère augmentation. Cette nuance particulière pourrait potentiellement s'expliquer par les propriétés d'inertie thermique propres à l'eau.

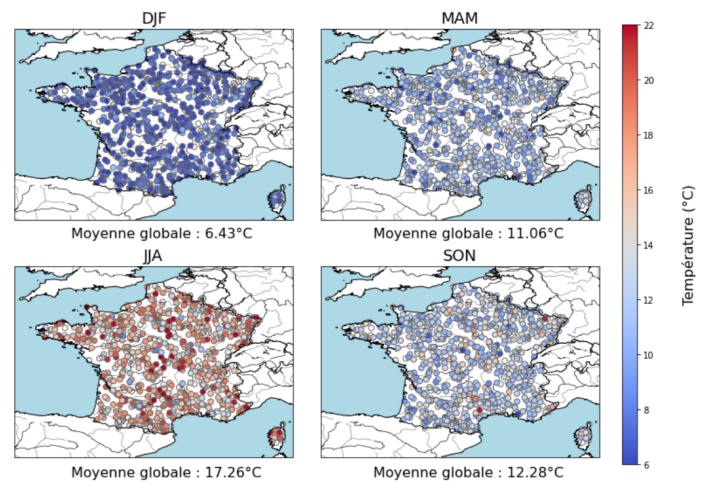


Figure 3: Température moyenne sur la période 2006-2022 pour chacune des stations par saison

3 Evolution au cours du temps

Cette section présente une étude sur les tendances des températures de l'eau. Initialement, l'idée était de voir si l'on observe une augmentation des températures de l'eau, augmentation qui pourrait être due au changement climatique. J'ai commencé par comparer les données de début et de fin de période, puis j'ai calculé des tendances.

3.1 Comparaison début/fin de période

Dans une première étape de mon analyse, j'ai choisi de générer des graphiques de densité de données pour deux périodes temporelles distinctes : le début de la période d'observation (2006-2008) et la fin de cette même période (2020-2022). La Figure 4 illustre clairement que l'augmentation de la fréquence des températures chaudes ne se manifeste pas de manière évidente. En revanche, ce qui ressort davantage, c'est la diminution de la fréquence des températures froides.

Cette constatation peut être influencée par divers facteurs. Parmi eux, la fonte estivale des neiges et le processus d'évaporation jouent un rôle crucial. La fonte de neige durant les mois estivaux pourrait contribuer à maintenir les températures à des niveaux relativement modérés pendant cette période. En effet, lors de cette fonte, l'environnement absorbe une quantité significative de chaleur, ce qui limite l'augmentation des températures. Parallèlement, l'évaporation, un processus tout aussi essentiel, peut exercer son influence sur les températures de l'eau. Lorsque l'eau s'évapore, elle absorbe de l'énergie sous forme de chaleur, engendrant ainsi un effet rafraîchissant. Une augmentation de l'évaporation peut contribuer à maintenir les températures de l'eau à des niveaux relativement stables, particulièrement pendant les périodes estivales où l'évaporation atteint son maximum ([Ouellet and Caissie \(2023\)](#)). Ces éléments complexes concourent à façonner les dynamiques thermiques des rivières observées.

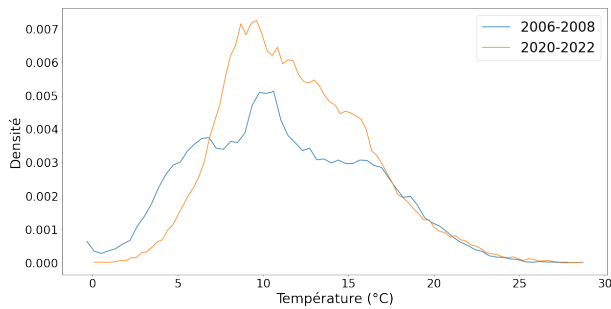


Figure 4: Fonction de densité des données de température de l'eau sur deux périodes : en bleu 2006-2008 et en orange 2020-2022

3.2 Calcul de tendances

Après cette étape préliminaire, j'ai procédé au calcul des tendances temporelles relatives à l'évolution des températures de l'eau. Cette évaluation a été réalisée en utilisant des régressions linéaires appliquées aux données annuelles. Afin d'obtenir une perspective plus complète de cette évolution, j'ai décidé de concentrer mon analyse sur la période allant de 2008 à 2021. Cette plage a été choisie en raison de l'absence de données pour les années 2006, 2007 et 2022.

Les résultats issus de ces régressions linéaires pour la période 2008-2021 sont graphiquement représentés dans la figure 5. À gauche, le tracé illustre l'évolution temporelle des données annuelles de température de l'eau, accompagné de pointillés noirs indiquant la moyenne globale de l'ensemble des stations. À droite, les tendances d'évolution de la température de l'eau pour chaque station sont présentées. Ces tendances sont marquées par des cercles de diverses tailles, signifiant si la tendance calculée est statistiquement significative à un niveau de confiance de 95

Cependant, il est crucial de noter que la limitation des données impacte la possibilité de déterminer des tendances significatives. Parmi les nombreuses stations évaluées, seules 73, soit 10 % d'entre elles, disposent de données suffisamment robustes pour établir des tendances statistiquement significatives. Cette analyse révèle une variabilité spatiale marquée dans les tendances observées, avec des variations prononcées atteignant parfois $\pm 4^\circ\text{C}/\text{an}$, ce qui peut sembler peu plausible.

Lors du calcul des moyennes annuelles, j'ai opté pour une approche uniforme, ignorant les périodes où les données pourraient faire défaut. Toutefois, il convient d'aborder ces résultats avec une dose de prudence en raison de la possibilité de biais potentiels dus à des lacunes dans les données. Par exemple, si des périodes spécifiques telles que l'hiver présentent systématiquement des absences de données sur la fin de la période, cela pourrait entraîner une surestimation des tendances.

Pour contourner ce problème, j'ai adopté une méthodologie similaire mais en ne prenant en compte que les années disposant de données pour les 12 mois (Fig 5). Cette approche a révélé une réduction significative du nombre de données disponibles. Le nombre de séries de données consécutives, permettant le calcul des tendances d'évolution de la température de l'eau, a considérablement diminué. Cela a inévitablement engendré une diminution des tendances statistiquement significatives, se limitant à seulement 3. Néanmoins, ces tendances semblent mieux correspondre aux attentes, étant plus modérées et globalement positives.

Pour parvenir à des tendances plus robustes dans cette étude, il serait judicieux d'adopter un filtrage des données moins rigide tout en évitant tout biais potentiel, ou encore d'accéder à des séries

temporelles plus étendues en termes de données de température de l'eau.

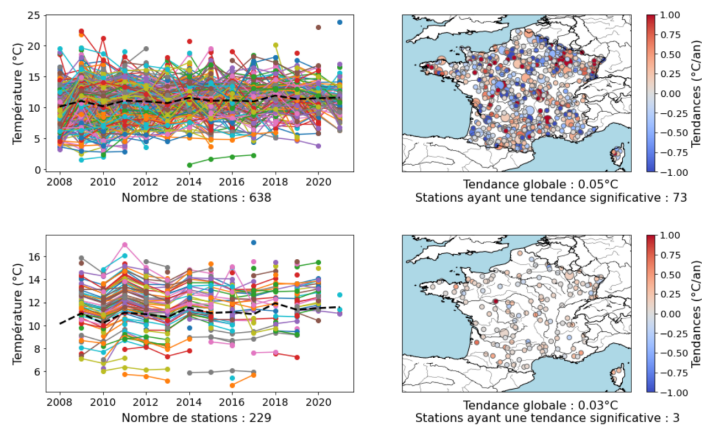


Figure 5: La figure présente l'évolution au fil du temps des données de température de l'eau à une fréquence annuelle (à gauche), avec les pointillés noirs indiquant la moyenne de toutes les stations. À droite, la tendance d'évolution de la température de l'eau pour chaque station est affichée. Les données du haut sont basées sur données complètes de températures mensuelles moyennées, tandis que celles du bas conservent uniquement les années avec des données pour les 12 mois.

4 Corrélations entre température de l'eau des rivières et température de l'air

En raison des contraintes liées à la disponibilité limitée des données pour la surveillance des températures de l'eau, ainsi que de la praticité d'accès aux données de température de l'air, de nombreux utilisateurs ayant besoin d'informations sur les cours d'eau se tournent vers la température de l'air comme indicateur. Un exemple emblématique est fourni par EDF, qui estime la température de l'eau en amont de ses centrales nucléaires en moyennant les données de température de l'air sur une période de 10 jours.

C'est dans ce contexte que j'ai entrepris une démarche visant à vérifier cette corrélation en comparant mes propres mesures de température de l'eau avec les données de température de l'air issues des réanalyses SAFRAN.

Les réanalyses SAFRAN sont des jeux de données climatiques à haute résolution spécifiquement développés pour la France. Elles résultent de la fusion de relevés météorologiques, de modèles numériques de prévision et de données topographiques, et elles peuvent être exploitées à l'échelle régionale et locale. Ces réanalyses fournissent des informations capitales sur des paramètres comme la température, les précipitations, l'humidité du sol et le rayonnement solaire sur une période historique prolongée (Durand et al. (1993)).

La première étape de mon approche a été d'examiner l'existence d'une corrélation entre les températures de l'air et de l'eau. À cet effet, j'ai calculé les corrélations entre ces deux variables pour chaque station de mon réseau d'observation et présenté les résultats sous forme de carte (Fig 6). Comme anticipé, une corrélation significative entre les températures de l'air et de l'eau a été observée, sans qu'un motif spatial spécifique ne soit aisément identifiable. Pour approfondir cette corrélation, j'ai également évalué la relation en calculant la moyenne des températures de l'eau sur une période de 10 jours, empruntant ainsi la méthode utilisée par EDF. En examinant la figure 6, une corrélation robuste entre ces deux paramètres est manifeste.

Cependant, il est pertinent de relever que la corrélation moyenne à l'échelle du territoire est plus prononcée lorsque la moyenne de la température de l'air est calculée sur 10 jours. Plus spécifiquement, la corrélation atteint 0,91 pour une moyenne sur 10 jours, en comparaison à 0,88 pour la température simple.

Cette mise en relation entre les températures de l'eau des rivières et celles de l'air pourrait être exploitée pour enrichir nos ensembles de données. Dans cette optique, différentes approches sont envisageables. L'une d'entre elles consisterait à adopter la méthode d'EDF en moyennant les données de température de l'air sur 10 jours. Pour une approche plus élaborée, il serait envisageable de suivre la démarche du projet TIGRE (Beaufort et al. (2020)) : engager une analyse station par station pour déterminer la durée optimale sur laquelle devrait être calculée la moyenne de la température de l'air, dans le but d'atteindre une corrélation optimale.

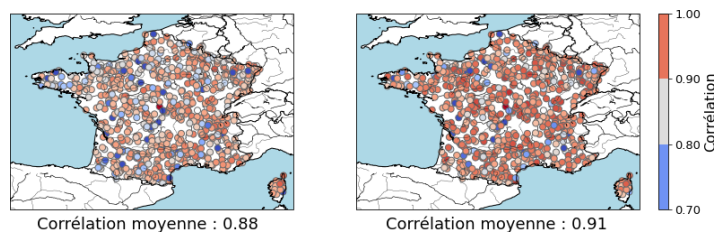


Figure 6: Corrélation entre la température de l'eau et la température de l'air (à gauche) moyennée sur 10 jours (à droite) pour chaque station.

5 Conclusions

En somme, cette étude a concentré ses efforts sur la profonde compréhension des variations et des tendances des températures de l'eau des rivières en France. Dans le contexte actuel de bouleversements climatiques et de pressions humaines exercées sur les écosystèmes aquatiques, la précise évaluation des températures de l'eau s'avère cruciale pour une gestion durable de ces ressources vitales.

La méthodologie choisie a impliqué l'exploitation des données d'observation in-situ pour extraire des tendances et des connexions significatives. Les étapes analytiques ont été structurées de la sorte : elles ont débuté par le traitement des données brutes et se sont poursuivies avec l'examen des variations saisonnières, des évolutions temporelles et des corrélations avec les températures de l'air.

Les résultats obtenus ont mis en lumière les variations saisonnières typiques des températures de l'eau, avec des valeurs plus basses en hiver et plus élevées en été. De plus, malgré les limitations imposées par les données insuffisantes, les analyses des tendances ont révélé une diversité de schémas spatialement hétérogènes, témoignant de la complexité des dynamiques thermiques dans les rivières françaises.

L'étude des corrélations entre les températures de l'eau et celles de l'air a mis en évidence une relation significative, ouvrant la porte à des perspectives captivantes pour enrichir les données de température de l'eau par le biais de relevés plus accessibles de la température de l'air. Diverses approches, telles que l'adoption de méthodes semblables à celles d'EDF ou l'exploration de modèles plus élaborés tels que le projet TIGRE, pourraient être examinées.

Cette étude a jeté des fondations solides pour une compréhension accrue des températures de l'eau dans les rivières françaises. Néanmoins, certains défis persistent, notamment les contraintes liées aux données disponibles et les variations spatiales complexes.

Des initiatives plus poussées pourraient comprendre une extension des séries chronologiques, un affinement des analyses statis-

tiques et une exploration plus profonde des interactions entre les températures de l'eau et les facteurs environnementaux. De telles initiatives pourraient grandement enrichir notre connaissance des écosystèmes aquatiques et fournir des éclairages essentiels pour guider les décisions de gestion en vue d'assurer leur durabilité dans un contexte de changements globaux.

Remerciements. Je voudrais remercier mes encadrants, Bertrand Decharme et Simon Munier, pour leur guidance, leur expertise et leur soutien constant tout au long de ce stage, mais aussi toute l'équipe du GMGEC pour son accueil chaleureux. Merci aussi à ma famille et à mes amis pour leur soutien inconditionnel tout au long de mon parcours académique. Leur amour et leurs encouragements ont été ma source de motivation et de détermination.

References

- 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, thèse de doctorat dirigée par Moatar-Bertrand, Florentina et Curie, Florence Géosciences environnement Tours 2015.
- Beaufort, A., F. Moatar, E. Sauquet, and C. Magand, 2020: Thermie en rivière : Analyse géostatistique et description de régime : Application à l'échelle de la France. Research report, INRAE.
- Caissie, D., 2006: The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*, **51** (8), 1389–1406, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>.
- Durand, Y., E. Brun, L. Merindol, G. Guyomarc'h, B. Lesaffre, and E. Martin, 1993: A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of Glaciology*, **18**, 65–71, doi:10.3189/S0260305500011277.
- Hannah, D. M. and G. Garner, 2015: River water temperature in the United Kingdom: Changes over the 20th century and possible changes over the 21st century. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, **39** (1), 68–92, doi:10.1177/0309133314550669.
- Ouellet, V. and D. Caissie, 2023: Towards a better understanding of the evaporative cooling of rivers: case study for the little southwest miramichi river (new brunswick, Canada). *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, **48** (2), 189–205, doi:10.1080/07011784.2023.2177196.