

Rapport de stage fin d'études
École Nationale de la Météorologie

Janvier - Juillet 2023

**Modélisation de la température de l'eau
des rivières à l'échelle de la France dans le
système hydrologique ISBA-CTRIP**

Zoé Loreau

Encadrée par :

Bertrand Decharme (DESR/CNRM/GMGEC/EST)

Simon Munier (DESR/CNRM/GMME/SURFACE)

Résumé

Ce rapport aborde la question importante de l'évolution des températures de l'eau des rivières dans un contexte de changement climatique. C'est une question importante car cette évolution va avoir un impact sur les écosystèmes aquatiques, l'environnement et la société.

Mon étude s'est articulée autour de plusieurs étapes méthodologiques. Premièrement, la préparation et l'analyse des données d'observation ont joué un rôle central pour ensuite permettre l'intégration de la température de l'eau dans le système de modélisation ISBA-CTRIP. L'utilisation de la banque de données Naïades m'a fourni des mesures semi-horaires provenant de nombreuses stations en France métropolitaine, toutefois entachées de valeurs aberrantes et de lacunes. Le filtrage et le traitement de ces données que j'ai effectués ont été cruciaux pour garantir la qualité des observations et leur cohérence avec les simulations du modèle.

Deuxièmement, j'ai analysé ces données et mis en lumière, via leurs climatologies, des variations saisonnières classiques, tandis que des tendances temporelles significatives ont été identifiées malgré les limites des données manquantes. J'ai aussi mis en évidence des corrélations positives entre les températures de l'eau des rivières et de l'air, ouvrant la voie à une utilisation de la température de l'air comme approximation de la température de l'eau, notamment dans les régions dépourvues de données spécifiques.

Enfin, j'ai implémenté une équation simplifiée d'évolution de la température de l'eau dans le modèle CTRIP. Les comparaisons entre les simulations que j'ai faites et les observations ont révélé des similitudes encourageantes, en particulier pour les rivières de grande envergure, bien qu'il subsiste des biais dû à l'absence d'échanges énergétiques dans mon approche simplifiée.

En résumé, ce rapport donne une bonne vue des variations thermiques des rivières en France métropolitaine et pointe du doigt la nécessité d'avoir à notre disposition des données plus complètes afin de réaliser des analyses plus robustes. Néanmoins, l'intégration de la température des rivières dans le modèle CTRIP ouvre de nouvelles perspectives pour mieux appréhender les interactions complexes entre les processus hydrologiques et climatiques à l'échelle continentale.

Mots-clés : température des rivières, hydrologie, changement climatique

Remerciements

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers toutes les personnes qui ont rendu mon stage de fin d'études enrichissant.

Tout d'abord, je voudrais remercier chaleureusement mes encadrants, Bertrand Decharme et Simon Munier, pour leur guidance, leur expertise et leur soutien constant tout au long de ce stage. Leurs conseils avisés et leur disponibilité ont grandement contribué à la réussite de mon stage.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers mes collègues de bureau, Hugo et Aurélien. Nos échanges et leurs bonne humeur ont créé une atmosphère de travail conviviale et stimulante. Les discussions que nous avons eues ont élargi mes horizons et m'ont permis d'approfondir ma réflexion.

Enfin, je tiens à remercier 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. Merci à Carole, Samuel et Quentin pour leur aide dans la rédaction de la fin de mon rapport.

Ce stage a été une expérience inoubliable, et je suis reconnaissante envers chacune des personnes qui y ont contribué. Leurs encouragements, expertise et amitié ont eu un impact positif sur moi, et je suis impatiente de continuer à développer les compétences et les connaissances que j'ai acquises ici.

Sommaire

1	Introduction	1
1.1	Contexte	1
1.2	Etat de l'art	2
1.3	Objectifs et méthode	3
2	Récupération et mise en forme des données d'observation	5
2.1	Récupération des données	5
2.2	Mise en forme des données	6
3	Étude des données d'observation	10
3.1	Climatologies	10
3.2	Tendances	12
3.3	Corrélations entre la température de l'eau des rivières et la température de l'air	16
4	Modélisation dans CTRIP	20
4.1	Description de CTRIP	20
4.2	Simplification de l'équation de la température de l'eau	21
4.3	Implémentation dans le modèle	22
5	Comparaison observations vs modèle	24
5.1	Comparaison sur des stations précises	24
5.2	Comparaison globales	26
6	Conclusions	28

1 Introduction

Ce rapport vise à fournir une première analyse des températures de l'eau des rivières sur la France métropolitaine en utilisant à la fois des données d'observation in-situ et une modélisation simple basée sur le modèle CTRIP. Le but est d'améliorer à moyen terme notre compréhension (1) de l'évolution de ces températures de l'eau des échelles journalière à pluri-annuelle, (2) de leurs implications environnementales, et (3) de leurs impacts sociétaux.

1.1 Contexte

La mise en place d'un tel modèle aurait des implications majeures, car il nous permettrait d'évaluer de manière exhaustive l'évolution passée, présente et future de la température de l'eau des cours d'eau, tout en nous permettant de répondre à de nouvelles questions scientifiques.

Les rivières jouent un rôle essentiel dans l'équilibre de notre environnement, fournissant de l'eau douce, abritant une biodiversité riche et contribuant à des écosystèmes vitaux. La surveillance des températures des rivières revêt une importance cruciale, car elle offre un aperçu clé de la santé et du fonctionnement de ces écosystèmes aquatiques (Caissie [2006]). Des températures excessivement élevées peuvent avoir des conséquences dévastatrices, entraînant une augmentation du taux de mortalité chez certaines espèces de poissons, tout en favorisant la prolifération d'algues nuisibles, ce qui peut entraîner une détérioration significative de la qualité de l'eau et perturber l'équilibre écologique des écosystèmes fluviaux.

Par ailleurs, la température de l'eau des rivières a des répercussions majeures dans le domaine socio-économique (Hannah and Garner [2015]). Par exemple, les centrales nucléaires, qui utilisent l'eau des rivières comme moyen de refroidissement de leurs réacteurs, sont soumises à des réglementations strictes visant à limiter la température de rejet. Cependant, lors de l'été 2022, cette température critique a été largement dépassée dans cinq centrales, obligeant ainsi ces dernières à solliciter des dérogations pour poursuivre leurs activités. Cette situation met en évidence l'importance cruciale de comprendre les fluctuations de température des rivières afin de prendre des décisions éclairées et d'assurer une gestion appropriée des ressources en eau.

Au fil du temps, les rivières ont été touchées par des changements climatiques, des activités humaines telles que l'urbanisation, l'agriculture et l'industrialisation, ainsi que par les modifications des régimes hydrologiques. Ces facteurs peuvent influencer les températures des rivières (Beaufort [2015]), ce qui a des répercussions sur la qualité de l'eau, la reproduction des espèces aquatiques et les interactions entre les organismes vivants.

L'étude des données d'observation et la mise en œuvre d'un modèle de température de l'eau nous permettraient de vérifier si la température des cours d'eau connaît une augmentation avec les changements climatiques. En outre, elles nous permettraient de prévoir et d'anticiper les épisodes extrêmes de température, tout en évaluant les effets de l'anthropisation sur ce paramètre essentiel.

1.2 Etat de l'art

1.2.1 Les observations

En 2008, l'Office Français de la Biodiversité (OFB) a établi le Réseau National de Température (RNT) pour surveiller en continu et à long terme les variations de la température des cours d'eau en France, avec des mesures automatiques effectuées chaque heure.

Une étude portant sur les données de température en France, connue sous le nom de projet TIGRE (Beaufort et al. [2020b]), est menée en collaboration entre l'INRAE et l'Université de Tours. Cette étude vise à analyser les fluctuations de température dans les cours d'eau, en particulier dans le bassin de la Loire. Elle utilise des méthodes statistiques et géostatistiques pour estimer les températures le long des réseaux hydrographiques. Le projet TIGRE comprend plusieurs étapes, notamment la collecte approfondie des données de température, la détermination de mesures significatives, l'évaluation des données statistiques, l'acquisition de données spatiales pour identifier des schémas thermiques similaires, et enfin, l'analyse des facteurs influents et le développement de modèles pour prédire les températures dans des zones non surveillées.

Il a été identifié trois principaux types d'anomalies dans les enregistrements de température, selon les conclusions du projet TIGRE (Beaufort [2015]) :

- Anomalies d'enregistrement causées par des erreurs lors de la mise en place de la sonde ou pendant la surveillance de température. Des pics initiaux fréquents peuvent être corrigés sur plusieurs jours en raison du calibrage de la sonde. De plus, des erreurs de saisie ont entraîné la duplication des données, affichant deux températures pour la même heure.
- Anomalies dues à l'exondement de la sonde, identifiables par une augmentation rapide des amplitudes quotidiennes, pouvant dépasser 7°C. Ces cas sont comparés aux chroniques de température de l'air pour valider l'hypothèse d'exondement.
- Anomalies résultant de l'enfouissement de la sonde, caractérisées par des enregistrements de signaux peu variables, moins fréquentes et plus difficiles à identifier.

1.2.2 La modélisation

Actuellement, il n'existe aucun modèle complet capable de prévoir les variations de température des rivières sur la France métropolitaine, mais il en existe qui ont été appliqués à d'autres domaines. Différentes méthodes sont utilisées pour modéliser la température de l'eau des rivières, chacune présentant des avantages et des inconvénients.

- Les modèles statistiques sont relativement simples à mettre en place et fournissent des estimations rapides, même avec des ensembles de données limités. Cependant, ils ne prennent pas en compte les processus physiques sous-jacents et leur exactitude peut être limitée en cas de changements importants dans les conditions environnementales.
- Les modèles de réseaux de neurones utilisent des techniques d'apprentissage automatique pour capturer des relations complexes et non linéaires, mais nécessitent une quantité considérable de données d'entraînement et peuvent être difficiles à interpréter.
- Les modèles physiques reposent sur des principes scientifiques solides, permettant d'étudier différents scénarios et d'évaluer l'impact des changements environnementaux. Cependant, ils requièrent des données détaillées sur la géométrie de la rivière et les propriétés thermiques, ainsi qu'une expertise technique pour la mise en œuvre et

la calibration. De plus, ces modèles sont sensibles aux incertitudes liées aux données d'entrée.

Afin de pouvoir prendre en compte le changement climatique et pour s'affranchir du besoin des données d'observations, on a choisi d'utiliser une approche physique. Cela nous permettra d'avoir une meilleure compréhension des processus ayant lieu dans les environnements fluviaux.

Dans la littérature, l'équation d'évolution de la température de l'eau T (K) est donnée par :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -V \frac{\partial T}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{H_{total}}{\rho c_p d} + S \quad (1)$$

où :

- $T(K)$ est la température de l'écoulement,
- $V(m/s)$ est la vitesse de l'écoulement,
- $D_L(m^2/s)$ est le coefficient de diffusion,
- $\rho(kg/m^3)$ est la masse volumique du fluide,
- $c_p(J/K/kg)$ est la capacité calorifique massique,
- $d(m)$ est la hauteur de la rivière,
- $S(K/s)$ représente les sources de température via les eaux souterraines et les ruissellement de surface,
- $H_{total}(W/m^2)$ est la somme des flux énergétiques.

H_{total} est donné par le bilan énergétique du système rivière, schématisé par la figure 1.1. C'est la somme des différents flux énergétiques interagissant avec la rivière à l'interface air-eau et/ou à l'interface eau-sol : les flux radiatifs H_{sw} et H_{lw} , latent H_e , sensible H_s , de conduction de chaleur dans le sol H_{bhf} .

$$H_{total} = H_{sw} + H_{lw} + H_e + H_s + H_{bhf} \quad (2)$$

Les flux radiatifs, en particulier le rayonnement solaire, ont une grande influence sur le bilan énergétique des cours d'eau, surtout en été, bien que des facteurs tels que la végétation et la topographie puissent atténuer cet impact. Le rayonnement infrarouge peut agir à la fois comme source et puits de chaleur. Les flux latents sont liés à l'évaporation et à la condensation de l'eau, tandis que les flux sensibles sont liés aux échanges convectifs entre l'air et la surface de l'eau. Le flux de conduction entre la colonne d'eau et le lit de la rivière joue également un rôle dans les variations saisonnières de la température des cours d'eau, notamment en hiver, bien qu'il soit généralement plus faible que les flux radiatifs.

1.3 Objectifs et méthode

Ce rapport se focalise sur l'étude des données d'observation et la modélisation des températures de l'eau. J'ai commencé par récupérer et par mettre en forme les données d'observation disponibles, en les organisant en fichiers horaires, journaliers et mensuels, afin de faciliter leur analyse ultérieure. J'ai ensuite procédé à l'étude détaillée de ces données d'observation pour identifier les tendances et les variations des températures de l'eau au fil du temps. Puis, je suis passée à l'implémentation de l'équation d'évolution de la température de l'eau dans le modèle

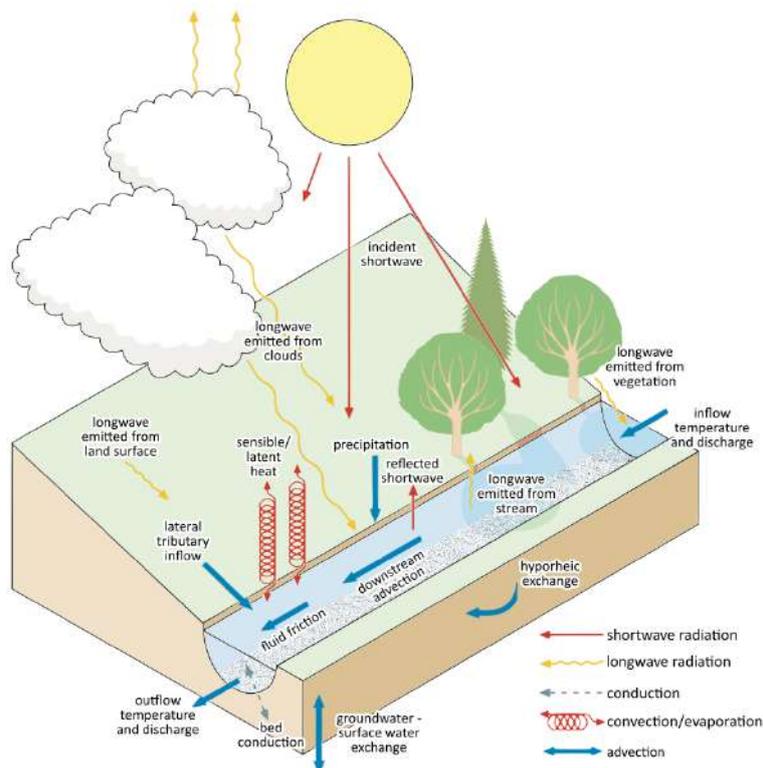


FIGURE 1.1 – Échanges hydrologiques et énergétiques influant sur la température des cours d'eau tiré de [Dugdale et al. \[2017\]](#).

CTRIP. Enfin, je présente les résultats obtenus grâce au modèle CTRIP et compare ces résultats avec les données d'observation. Cette comparaison nous permettra de discuter des similitudes et des différences entre les simulations issues du modèle et les observations réelles, tout en proposant des interprétations pertinentes.

2 Récupération et mise en forme des données d'observation

Avant d'entamer l'intégration de la température de l'eau dans ISBA-CTRIIP, mon travail a débuté par l'étude des données d'observation relatives à la température de l'eau. L'objectif était de se familiariser avec ces données et de les préparer en vue de valider le modèle.

2.1 Récupération des données

Les données de température de l'eau ont été extraites de la banque de données [Naiades](#). Ces données, disponibles sous forme d'un fichier CSV, englobent des relevés semi-horaires en heure locale provenant de 756 stations de mesure, dont 730 sont situées en France métropolitaine, et 26 à la Réunion. L'emplacement des stations en France métropolitaine est montré sur la figure 2.1.

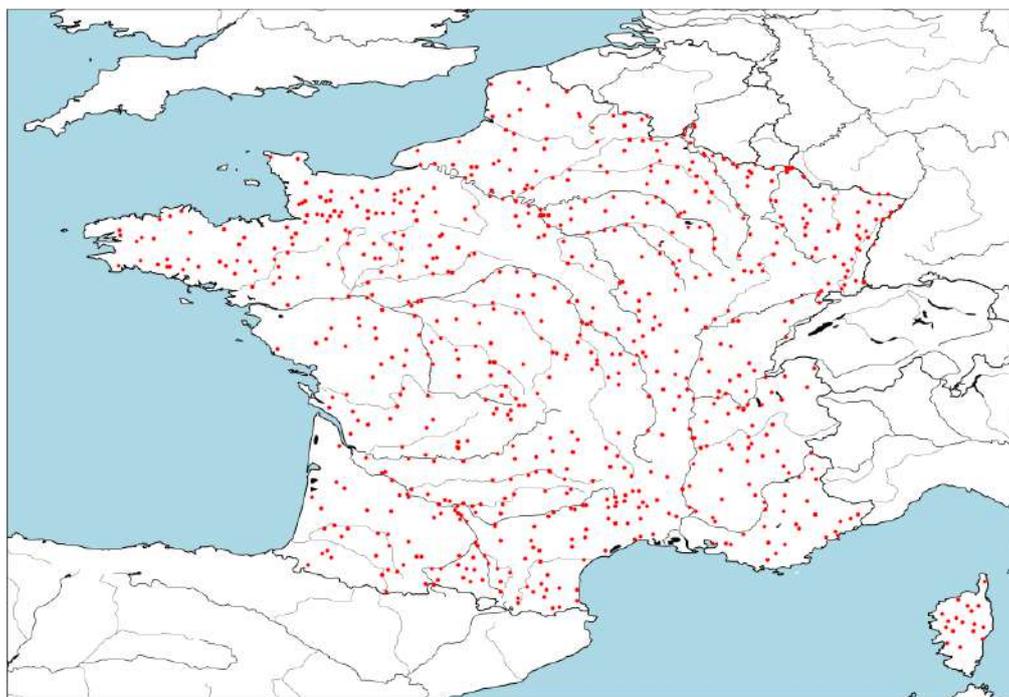


FIGURE 2.1 – Emplacement des stations métropolitaines

Une particularité des données est qu'elles sont exprimées en heure locale, ce qui pourrait poser des problèmes lorsqu'on souhaite étudier le cycle diurne de la température de l'eau et les comparer au modèle qui, quant à lui, est basé sur l'heure UTC.

Concernant la période couverte par les mesures, elle s'étend de 2006 à 2022. Toutefois, les années 2006, 2007 et 2022 sont sous-représentées, avec moins de 10 stations fournissant des données pour chacune de ces années, comme on peut le voir sur la figure 2.2. Par ailleurs, on a de moins en moins de stations de mesure de température de l'eau et de données d'observation. **Cette diminution significative renforce davantage la nécessité de modéliser la température de l'eau.**

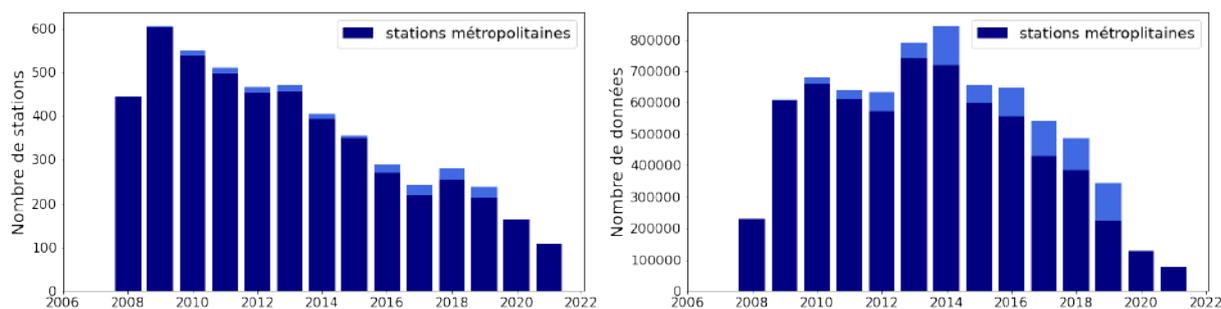


FIGURE 2.2 – Nombre de stations de mesure par an (gauche) ; nombre de données d’observations par an (droite)

2.2 Mise en forme des données

Afin de traiter les données d’observation, j’ai procédé à la création de fichiers NetCDF pour les pas de temps horaire, journalier et mensuel. Ces fichiers ont été organisés avec des dimensions comprenant une liste d’identifiants de stations et une liste d’instant. Seules les stations situées en France métropolitaine ont été conservées, et les coordonnées de ces stations ont été converties en latitude et longitude pour faciliter leur manipulation ultérieure.

2.2.1 Fichiers horaires

Pour créer le fichier NetCDF des données horaires à partir du fichier CSV initial, j’ai effectué une sélection en ne gardant que les données relevées aux heures pleines. Cependant, lors de l’examen de l’évolution temporelle annuelle de ces données, j’ai constaté un grand nombre de valeurs aberrantes, avec des températures de l’eau des rivières supérieures à 50°C, et paradoxalement, certaines températures descendant jusqu’à -100°C, comme on peut le voir sur la figure 2.3 qui présente l’évolution temporelle de la température de l’eau sur toutes mes stations pour les années 2012 et 2017.

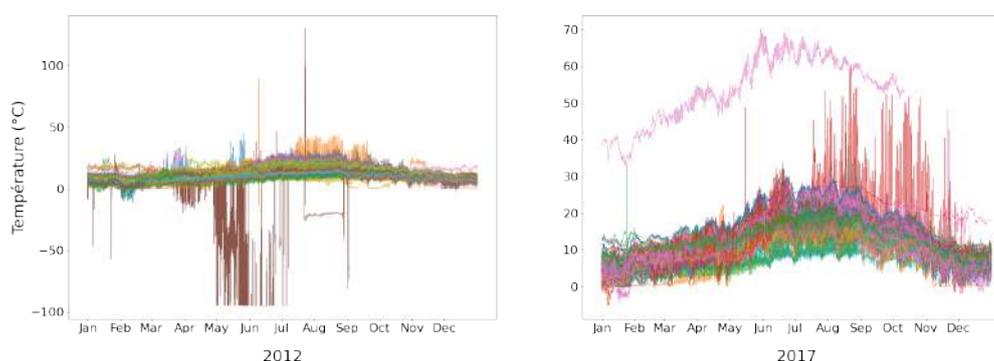


FIGURE 2.3 – Évolution temporelle de la température de l’eau sur 730 stations pour les années 2012 et 2017

Afin de filtrer les données aberrantes, deux versions supplémentaires du fichier horaire ont été élaborées. Dans la première version, les données enregistrant des températures supérieures à 35°C ou inférieures à -0.5°C ont été exclues. Ensuite, dans la seconde version, j’ai appliqué les filtres utilisés dans le cadre du projet TIGRE, mentionné précédemment. Lors de ce projet, les

données de température de l'eau ont été considérées comme aberrantes lorsqu'elles dépassaient certains seuils ou présentaient des variations trop importantes pour être réalistes. Ces seuils ont été déterminés en se basant sur les travaux de Beaufort [2015], Beaufort et al. [2020a], portant sur près d'une centaine de stations dans le bassin de la Loire, et ont été extrapolés pour prendre en compte la variabilité climatique à l'échelle de la France métropolitaine. Les seuils utilisés sont présentés dans le tableau 1.

TABLE 1 – Filtres appliqués aux données horaires, repris du ? ; T_{max} est la température horaire maximale sur un jour et T_{min} réciproquement

Type de filtre appliqué	Seuil
1 Maximum horaire par mois	Janvier : $T > 14^{\circ}\text{C}$
	Février : $T > 15^{\circ}\text{C}$
	Mars : $T > 20^{\circ}\text{C}$
	Avril : $T > 24^{\circ}\text{C}$
	Mai : $T > 28^{\circ}\text{C}$
	Juin : $T > 30^{\circ}\text{C}$
	Juillet : $T > 32^{\circ}\text{C}$
	Août : $T > 33^{\circ}\text{C}$
	Septembre : $T > 29^{\circ}\text{C}$
	Octobre : $T > 28^{\circ}\text{C}$
	Novembre : $T > 18^{\circ}\text{C}$
	Décembre : $T > 17^{\circ}\text{C}$
2 Minimum horaire absolu 3	$T < -0.5^{\circ}\text{C}$
3 Écart entre 2 heures consécutives	$T(h) - T(h-1) > 2^{\circ}\text{C}$
4 Amplitude diurne	$T_{max}(j) - T_{min}(j) > 7^{\circ}\text{C}$
5 Écart entre 2 jours consécutifs	$T_{max}(j) - T_{max}(j-1) > 3^{\circ}\text{C}$ ou $= 0^{\circ}\text{C}$
	$T_{min}(j) - T_{min}(j-1) > 3^{\circ}\text{C}$ ou $= 0^{\circ}\text{C}$

La Figure 2.4 présente l'évolution temporelle de la température de l'eau au long de l'année 2012. Trois graphiques sont présentés côte à côte pour mieux comprendre l'effet des différents filtres appliqués aux données. À gauche, on observe les données de départ, sans aucun filtrage, où l'amplitude des températures semble considérable et présente des valeurs extrêmes qui peuvent aller jusqu'à 120°C et descendent en-dessous de -50°C . Au milieu, les données ont été limitées en supprimant les valeurs supérieures à 35°C et inférieures à $-0,5^{\circ}\text{C}$. Cependant, malgré cette première approche de filtrage, on constate encore la présence de valeurs aberrantes, telles que des températures de l'eau étonnamment élevées en plein hiver, comme des relevés atteignant 25°C en janvier. Pour résoudre cette incohérence, la troisième visualisation à droite présente les données filtrées à l'aide des critères du projet TIGRE, qui ont permis d'éliminer de manière plus rigoureuse les valeurs anormales.

L'impact du filtrage selon les critères du projet TIGRE est également mis en évidence dans la Figure 2.5. Afin d'obtenir une perspective globale sur toute la période étudiée (2006-2022), les données ont été regroupées par mois, et des boîtes à moustaches ont été tracées pour visualiser la distribution des températures. Lorsque l'on observe les boîtes à moustaches correspondant aux données filtrées selon les critères du projet TIGRE, on remarque une dispersion plus resserrée, indiquant une meilleure cohérence des températures enregistrées. Ces boîtes à moustaches

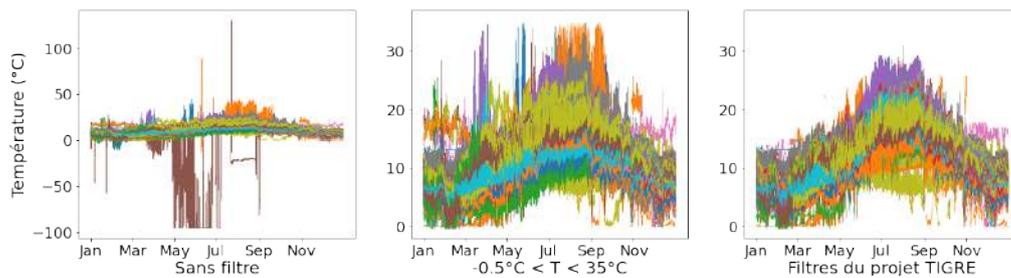


FIGURE 2.4 – Évolution temporelle de la température de l'eau sur 730 stations en 2012 avec à gauche les données initiales brutes, au milieu les données comprises entre -0.5°C et 35°C et à droite les données filtrées selon les critères du projet TIGRE

mettent clairement en évidence le cycle annuel de la température de l'eau des rivières, avec des fluctuations saisonnières cohérentes et prévisibles.

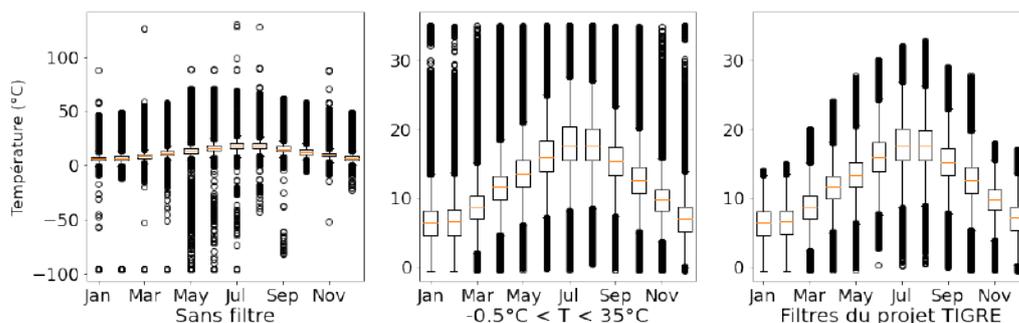


FIGURE 2.5 – Boxplot mensuels des données horaires de température de l'eau avec à gauche les données initiales brutes, au milieu les données comprises entre -0.5°C et 35°C et à droite les données filtrées selon les critères du projet TIGRE

Avec les filtres du projet TIGRE, la réalité des variations de température de l'eau des rivières paraît mieux représentée, plus cohérente. En éliminant les valeurs aberrantes, les données filtrées fournissent une base solide pour la validation et l'utilisation ultérieure du modèle. Ces résultats confirment l'importance et la pertinence des critères de filtrage du projet TIGRE dans la recherche de données de qualité pour améliorer notre compréhension du régime thermique des rivières en France.

J'ai donc décidé de garder les données horaires filtrées à partir des filtres du projet TIGRE. Ce tri dans les données nous fait passer d'un fichier horaire rempli à 27,5% à un fichier rempli à 22,8%. J'ai donc opté pour la conservation des données horaires filtrées selon les critères du projet TIGRE. Cette sélection a entraîné une diminution du taux de remplissage du fichier horaire initial, passant de 27,5 % à 22,8 %.

2.2.2 Fichiers journaliers et mensuels

À partir de la version horaire filtrée avec les critères du projet TIGRE, j'ai considéré qu'une donnée est manquante si elle n'est pas basée sur au moins 20 mesures horaires sur une

journée. Dans le cas contraire, les données horaires sont moyennées pour obtenir une valeur quotidienne.

Cette approche nous permet de pallier les éventuelles lacunes dans les relevés horaires tout en préservant une représentation fiable de l'évolution temporelle des données de température de l'eau au pas de temps quotidien, qui est présentée dans la figure 2.6.

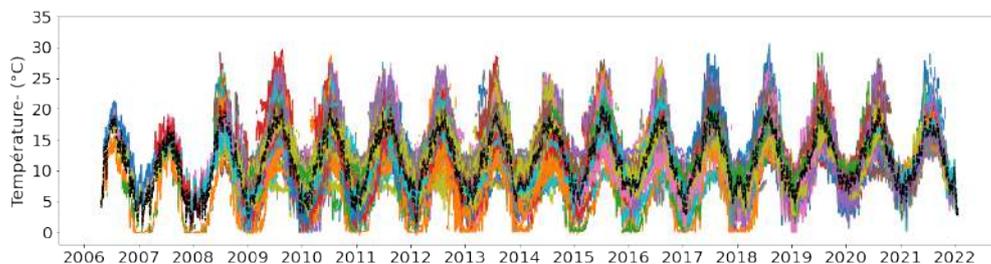


FIGURE 2.6 – Évolution temporelle de la température de l'eau au pas de temps journalier sur 730 stations de 2006 à 2022

Le même processus est appliqué pour la création du fichier mensuel, mais cette fois-ci en utilisant un seuil de 20 données journalières. En regroupant les données quotidiennes en moyennes mensuelles, nous obtenons une représentation plus synthétique des variations mensuelles de la température de l'eau des rivières. L'évolution temporelle des données de température de l'eau au pas de temps mensuel est montrée dans la figure 2.7, on note un manque cruel de données pour les années 2006, 2007 et 2022.

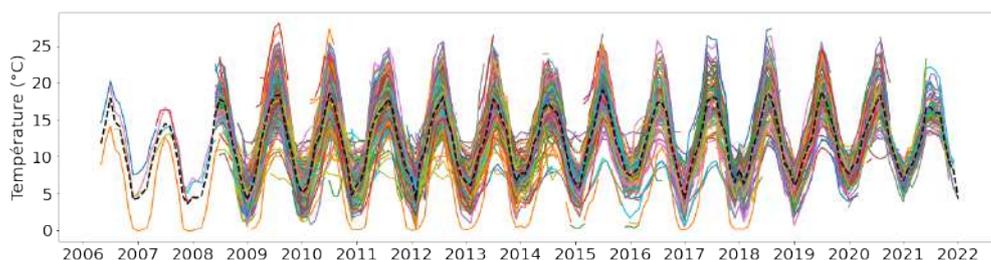


FIGURE 2.7 – Évolution temporelle de la température de l'eau au pas de temps mensuel sur 730 stations de 2006 à 2022

Avec ces données, nous disposons d'une base solide pour poursuivre notre étude des observations (section 3) et valider le modèle de température de l'eau qui va être implémenté dans CTRIP dans la partie 4 (section 5).

3 Étude des données d'observation

3.1 Climatologies

Pour amorcer l'étude de mes données d'observations, j'ai voulu analyser la variabilité spatiale des données de température de l'eau, regarder si l'on trouvait des zones définies avec des plus fortes températures par exemple. Pour cela, j'ai réalisé une moyenne mensuelle de mes données sur l'ensemble de la période pour chacune de mes stations de mesure. Les résultats obtenus ont été représentés sur une carte, qui est présentée dans la figure 3.1.

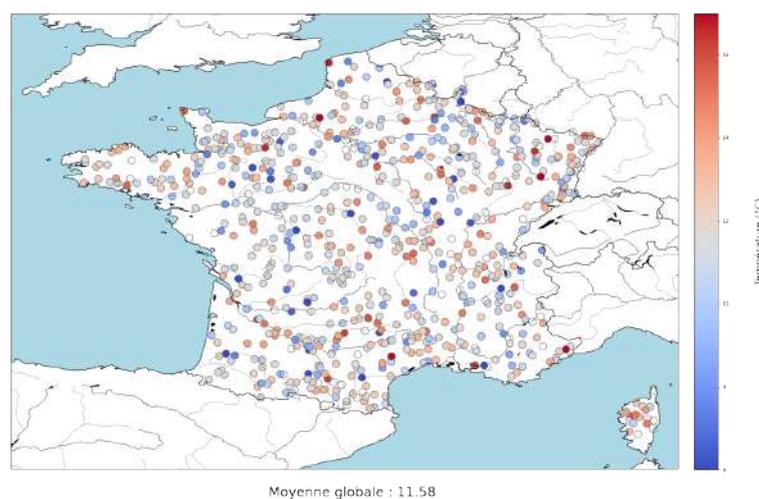


FIGURE 3.1 – Température moyenne sur la période 2006-2022 pour chacune des stations

On ne retrouve pas de motif dans la distribution spatiale des données de températures de l'eau. Il est tout à fait possible que cela soit lié à la présence de nombreuses données manquantes ainsi qu'à des périodes de relevés différentes pour les différentes stations. Cette disparité dans la disponibilité des données peut influencer significativement les résultats et masquer des schémas réels qui pourraient autrement être observés. En effet, les variations saisonnières et géographiques de la température de l'eau peuvent être influencées par des facteurs tels que la latitude, l'altitude, la proximité des masses d'eau, le climat local, ou encore des facteurs anthropiques tels que les activités industrielles ou agricoles. Cependant, si les données sont manquantes ou inégales pour certaines périodes ou stations, cela peut créer des écarts artificiels entre les stations voisines, rendant difficile l'identification de motifs cohérents.

Pour pallier cette limitation et obtenir une meilleure compréhension des variations spatiales de la température de l'eau dans notre étude, nous pourrions faire un travail de reconstruction des données manquantes de température de l'eau à partir des températures de l'air (corrélation entre ces deux paramètres étudiée dans la partie 3.3), mais ce n'était pas un objectif du stage.

Ensuite, j'ai analysé la saisonnalité des données de températures de l'eau. Pour ce faire, j'ai créé la Figure 3.2, qui présente quatre cartes représentant les moyennes saisonnières des données de température de l'eau.

Ces cartes fournissent une vue d'ensemble des variations saisonnières de la température de l'eau sur la France métropolitaine. Chaque carte représente une saison différente, mettant en évidence les différences potentielles entre les températures au fil des saisons.

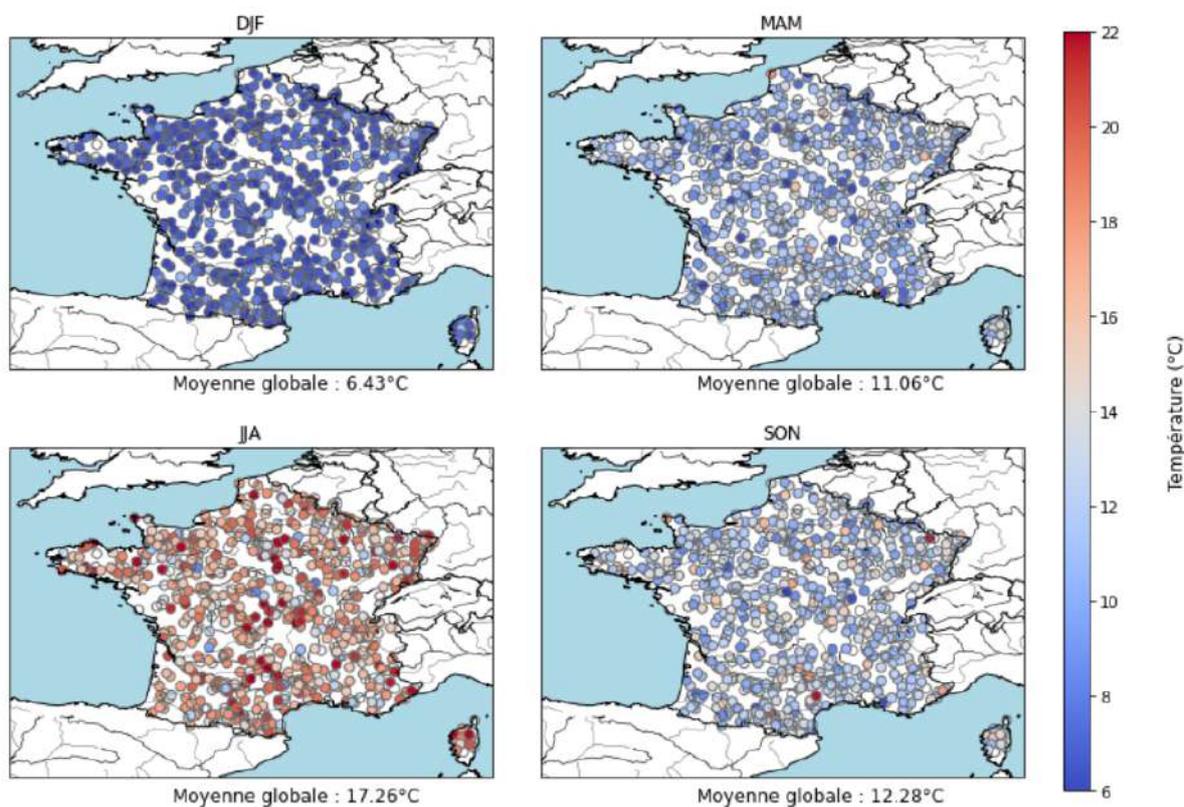


FIGURE 3.2 – Température moyenne sur la période 2006-2022 pour chacune des stations pour différentes saisons

Les résultats obtenus semblent conformes aux attentes : les températures de l'eau présentent des variations saisonnières typiques. En moyenne, les températures sont plus froides en hiver et plus chaudes en été, ce qui est cohérent avec les changements climatiques saisonniers. Les saisons du printemps et de l'automne se situent en tant que saisons médianes, mais une observation plus attentive révèle une légère différence entre elles. En effet, l'automne semble être légèrement plus chaud que le printemps, ce qui peut être attribué à l'inertie thermique de l'eau.

Enfin, j'ai voulu regarder le cycle annuel des températures de l'eau afin de visualiser les variations saisonnières de la température de l'eau tout au long de l'année. Pour cela j'ai agrégé les données par mois et effectué une moyenne pour chaque station. Le résultat de cette analyse est illustré dans la Figure 3.3. De plus, j'ai tracé en pointillés noirs la moyenne des températures sur l'ensemble des stations.

On observe une tendance générale de baisse des températures pendant les mois d'hiver, une période de transition au printemps, une augmentation progressive des températures en été, et une transition inverse à l'automne. Ces résultats sont conformes à nos attentes.

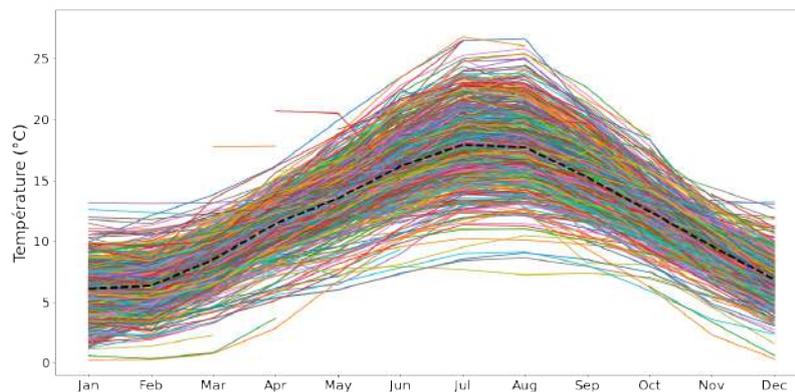


FIGURE 3.3 – Cycle annuel de température de l'eau

3.2 Tendances

Dans cette sous partie, je vais présenter l'étude des tendances des températures de l'eau que j'ai effectuée. À première vue, on pourrait s'attendre à une augmentation des températures avec le changement climatique. Pour mieux appréhender cette évolution, j'ai entrepris de tracer les fonctions de densité des données pour deux périodes distinctes : le début de la période d'observation (2006-2008) et la fin de la période (2020-2022).

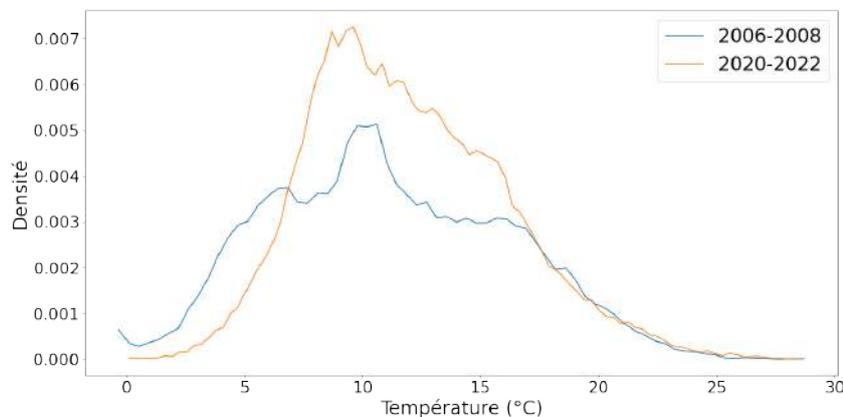


FIGURE 3.4 – Fonction de densité des données de température de l'eau sur deux périodes : en bleu 2006-2008 et en orange 2020-2022

La figure 3.4 nous montre qu'il n'y a pas nécessairement une augmentation de la fréquence des températures chaudes, mais plutôt une diminution de la fréquence des températures froides. Il est intéressant de noter que les températures chaudes n'affichent pas une tendance marquée à devenir plus fréquentes. Plusieurs facteurs pourraient contribuer à cette observation, dont la fonte de neige en été et l'évaporation (Ouellet and Caissie [2023]). La fonte de neige en été peut jouer un rôle dans le maintien de températures relativement modérées pendant cette période. Lorsque la neige fond, elle absorbe une grande quantité de chaleur de l'environnement, ce qui limite la hausse des températures. L'évaporation est également un processus important qui peut influencer les températures de l'eau. Lorsque l'eau s'évapore, elle absorbe de l'énergie

sous forme de chaleur, ce qui a un effet rafraîchissant. Une augmentation de l'évaporation peut contribuer à maintenir les températures de l'eau à des niveaux relativement stables, en particulier en été lorsque l'évaporation est plus prononcée.

Ensuite, j'ai décidé de calculer des tendances d'évolution temporelle de la température de l'eau. J'ai choisi de calculer ces tendances sur la période 2008-2021, étant donné le manque de données pour les années 2006, 2007 et 2022. J'ai moyenné les données mensuelles sur une année pour obtenir des données annuelles, puis j'ai effectué une régression linéaire pour chaque station.

La figure 3.5 présente les résultats de la régression linéaire sur la période 2008-2021. Sur la figure de gauche, j'ai représenté l'évolution temporelle de mes données annuelles de température de l'eau, avec la moyenne sur l'ensemble des stations indiquées en pointillés noirs. La figure de droite présente les tendances d'évolution de la température de l'eau à chaque station. Les cercles de différentes tailles indiquent si la tendance calculée est statistiquement significative à 95% : si le cercle est plus gros cela signifie que la p-value de la régression linéaire était inférieure à 0.05 et donc que la tendance est significative. La figure affiche aussi la tendance globale d'évolution de température de l'eau, qui est calculée en faisant la moyenne des tendances qui sont significatives.

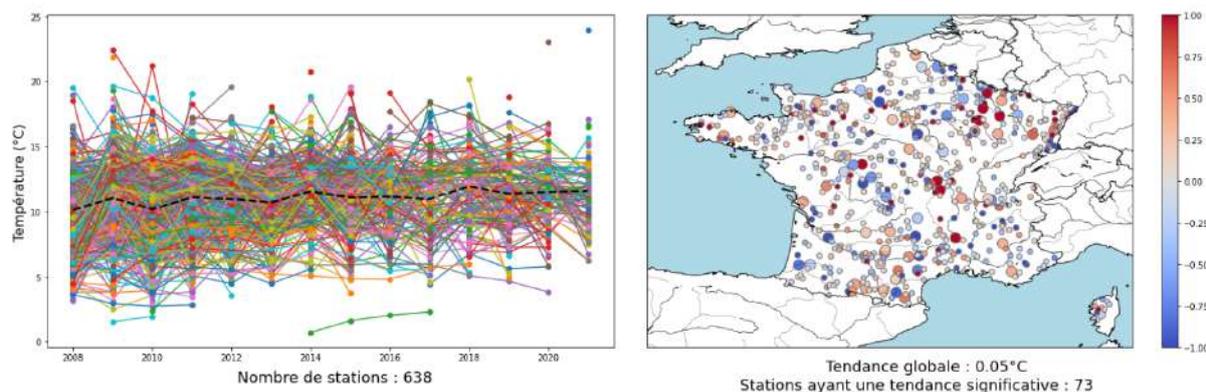


FIGURE 3.5 – Évolution temporelle des données de température de l'eau au pas de temps annuel sur 638 stations (à gauche), les pointillés noirs représentent la moyenne sur l'ensemble des stations ; Tendance d'évolution de la température de l'eau pour chaque station (à droite)

Tout d'abord, il est important de noter que le manque de données limite le calcul de tendances significatives. Sur les nombreuses stations évaluées, seulement 73 d'entre elles présentent des données suffisamment robustes pour déterminer des tendances statistiquement significatives. Ce chiffre représente 10% de l'ensemble des stations. Les résultats révèlent une grande variabilité spatiale des tendances observées, avec des variations marquées. Sur la figure 3.6 on constate que de nombreuses stations affichent des tendances de température importantes, pouvant même aller jusqu'à $\pm 4^\circ\text{C}/\text{an}$ ce qui ne paraît pas réaliste.

Lorsque j'ai effectué la moyenne des données sur une année, je l'ai fait de manière uniforme, sans distinction des périodes où des données pourraient manquer. Il est important d'aborder ces résultats avec prudence en tenant compte de la possibilité de biais potentiels liés au manque de données. En effet, si des périodes spécifiques, l'hiver par exemple, manquent de manière répétée dans les données sur la fin de période, on aurait une surestimation des tendances.

Afin de pallier ce problème j'ai décidé de suivre la même méthodologie, mais en ne prenant en compte que les années avec des données sur les 12 mois. Les résultats sont présentés dans la figure 3.7

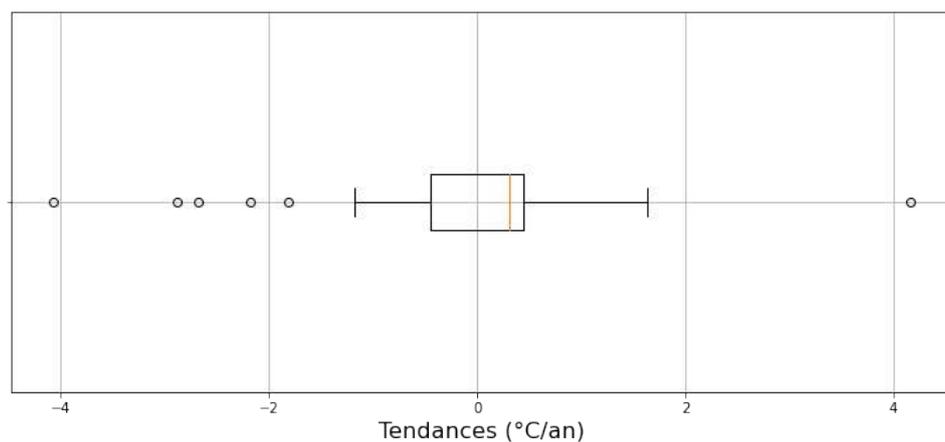


FIGURE 3.6 – Boîte à moustaches des tendances de température de l'eau

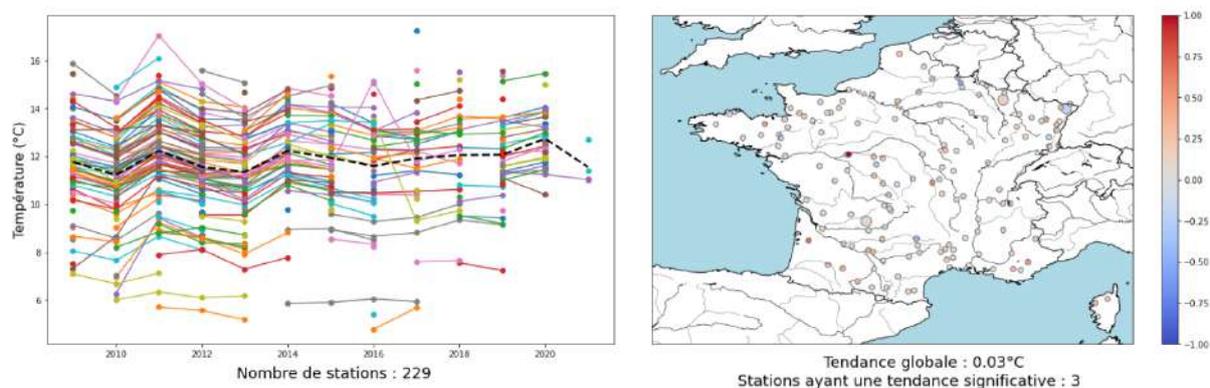


FIGURE 3.7 – Évolution temporelle des données de température de l'eau au pas de temps annuel, en ne gardant que les années ayant des données mensuelles sur 12 mois, sur 229 stations (à gauche), les pointillés noirs représentent la moyenne sur l'ensemble des stations ; Tendance d'évolution de la température de l'eau pour chaque station (à droite)

On observe une baisse du nombre de données frappante. On n'a plus beaucoup de longues séries consécutives de données sur lesquelles calculer des tendances d'évolution de température de l'eau. Cela se traduit par une baisse de tendances significatives, en effet on n'en a plus que 3. Néanmoins les tendances paraissent plus conformes à nos attentes, puisque plus modérées et globalement positives.

Dans une démarche visant à obtenir plus de tendances, et des tendances plus robustes, nous sommes repartis des données annuelles moyennées simplement, mais nous n'avons gardé que les stations qui avaient au moins un nombre de données suffisant en début et en fin de période. Par exemple, si l'on considère que 3 années en début et en fin de période sont suffisantes pour calculer des tendances robustes, nous n'avons gardé que les stations ayant au moins 3 données annuelles sur les périodes 2008-2014 et 2015-2021. Cette approche permet de s'assurer que les tendances calculées reflètent des évolutions plus fiables et moins susceptibles d'être influencées par des lacunes temporelles. La figure 3.8 montre les résultats de calcul de tendance selon cette approche pour différents seuils.

Plus l'on sélectionne des stations avec des longues périodes cohérentes d'observation, plus

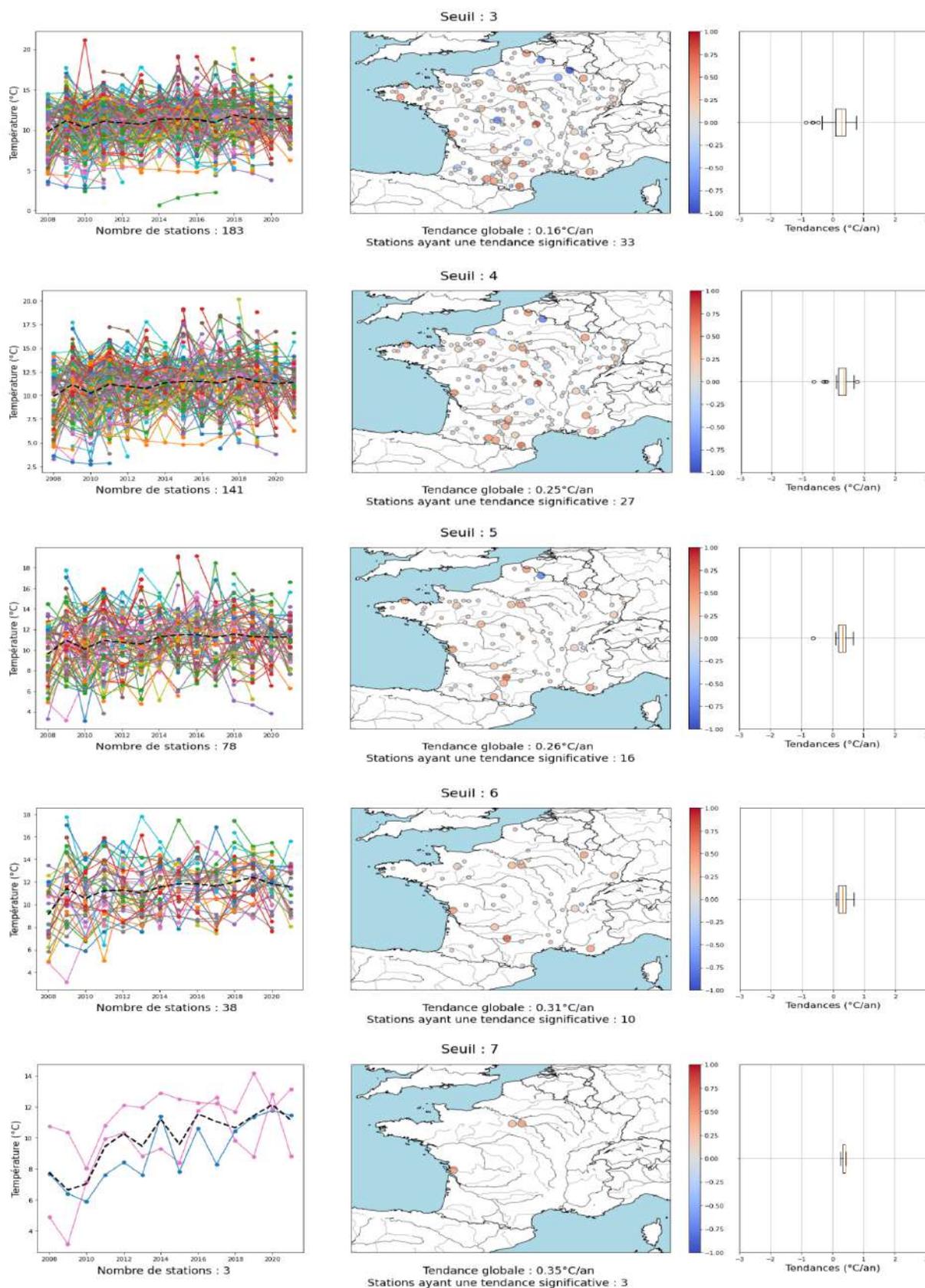


FIGURE 3.8 – Évolution temporelle des données de température de l'eau au pas de temps annuel pour différentes longueurs de chroniques minimales (à gauche), les pointillés noirs représentent la moyenne sur l'ensemble des stations ; Tendance d'évolution de la température de l'eau pour chaque station (au milieu) ; Boîte à moustache des tendances de température de l'eau (à droite)

les tendances de température de l'eau augmentent. En effet on passe d'une tendance globale de $0.16^{\circ}\text{C}/\text{an}$ pour un seuil de 3 ans à une tendance de 0.35°C par an pour des données complètes sur la période 2008-2021. Sans pouvoir être qualitatif faute de données plus nombreuses et complètes, on peut affirmer que la température des cours d'eau en France métropolitaine augmente avec le temps.

Enfin, je me suis dit qu'il serait intéressant de regarder les tendances d'évolution de la température de l'eau des rivières par saison. J'ai donc calculé pour chaque saison et chaque station les tendances de température et les ai tracées sur la figure 3.9. On remarque que toutes les tendances globales sont à la baisse pour toutes les saisons sauf l'automne, qui a une tendance positive marquée de $0.34^{\circ}\text{C}/\text{an}$. Néanmoins ces résultats sont à prendre avec des pincettes puisque seulement quelques dizaines de stations présentent des tendances significatives.

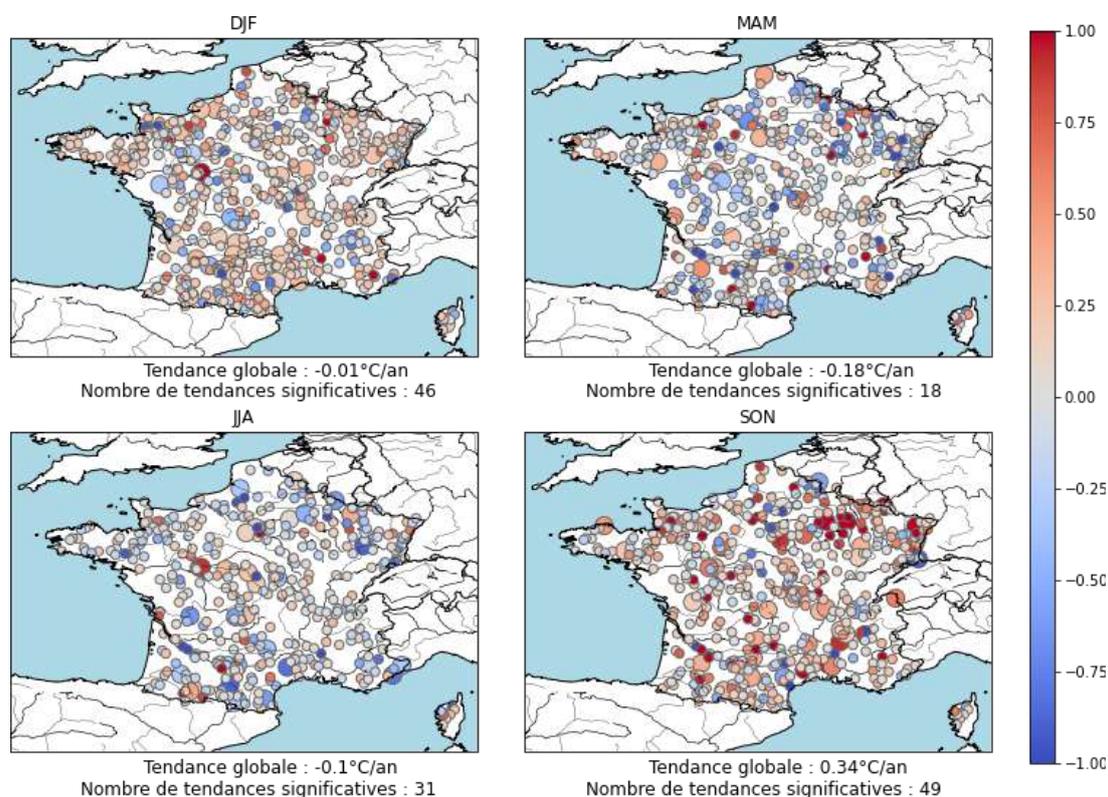


FIGURE 3.9 – Tendance d'évolution de la température de l'eau pour chaque station par saison

3.3 Corrélations entre la température de l'eau des rivières et la température de l'air

Actuellement, due à la limitation des données disponibles pour observer la température de l'eau, et en raison de la facilité d'accès aux données de température de l'air, certains utilisateurs ayant besoin de la température des rivières utilisent la température de l'air comme proxy. Un exemple en est EDF, qui calcule la température de l'eau en amont de ses centrales nucléaires en moyennant la température de l'air sur une période de 10 jours.

Dans ce contexte, j'ai entrepris une démarche visant à vérifier cette corrélation en comparant mes propres relevés de température de l'eau avec les données de température de l'air issues des réanalyses SAFRAN.

Les réanalyses SAFRAN sont des ensembles de données climatiques à haute résolution spécifiquement élaborées pour la France. Elles résultent d'une combinaison de relevés météorologiques, de modèles numériques de prévision et de données topographiques. Les caractéristiques clés des réanalyses SAFRAN englobent leur résolution spatiale fine, ce qui permet de détailler les variations climatiques à l'échelle régionale et locale. Ces réanalyses fournissent des informations essentielles sur des paramètres tels que la température, les précipitations, l'humidité du sol et le rayonnement solaire sur une période historique étendue. (Durand et al. [1993])

J'ai commencé par regarder s'il y avait une corrélation entre la température de l'eau et celle de l'air. Pour cela j'ai calculé la corrélation entre ces deux paramètres sur chaque station de mon réseau d'observation, et ai affiché les résultats sur une carte, c'est la figure 3.10.

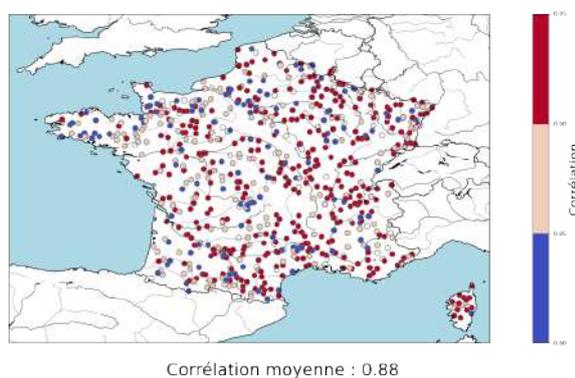


FIGURE 3.10 – Corrélation entre la température de l'air et la température de l'eau des rivières pour chaque station

Comme prévu, la température de l'air et la température de l'eau sont deux paramètres étroitement liés. Une corrélation significative est observée sans qu'un motif spatial spécifique ne soit identifié. Pour étudier davantage cette corrélation, j'ai ensuite testé la relation en moyennant la température de l'eau des rivières sur une période de 10 jours, comme le fait EDF. En observant la figure 3.11, une forte corrélation entre ces deux paramètres est également visible.

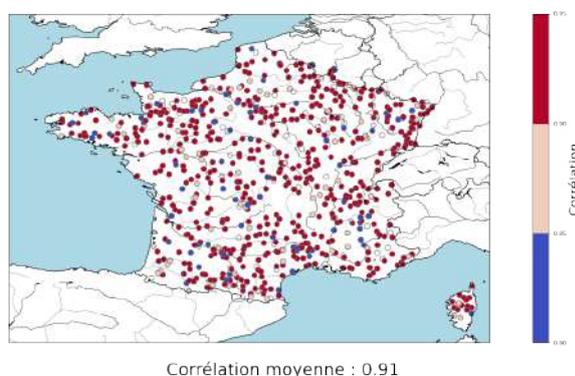


FIGURE 3.11 – Corrélation entre la température de l'air moyennée sur 10 jours et la température de l'eau des rivières pour chaque station

Cependant, il est intéressant de noter que la corrélation moyenne sur l'ensemble du territoire est plus élevée lorsqu'on utilise une moyenne sur 10 jours pour la température. Plus

précisément, elle s'établit à 0.91 avec une moyenne sur 10 jours, comparée à 0.88 avec la température simple.

La figure 3.12 illustre l'évolution de cette corrélation moyenne à travers le territoire français en fonction du nombre de jours sur lesquels la température de l'air est moyennée. On observe une corrélation moyenne élevée en moyennant sur 10 jours, cependant, la corrélation moyenne atteint son maximum lorsque la moyenne se fait sur 5 jours. Il n'y a pas une énorme différence avec la corrélation moyenne avec la température de l'air moyennée sur 10 jours, puisqu'on passe d'une corrélation de 0.910 à 0.913.

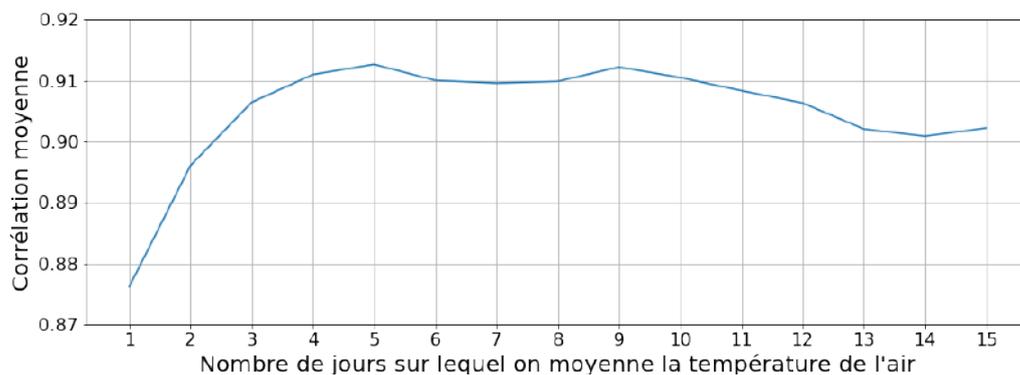


FIGURE 3.12 – Évolution de la corrélation entre la température de l'air et de l'eau des rivières en moyenne sur la France en fonction du nombre de jours sur lequel on moyenne la température de l'air

J'ai tracé une carte avec la corrélation entre la température de l'eau et la température de l'air moyennée sur 5 jours.

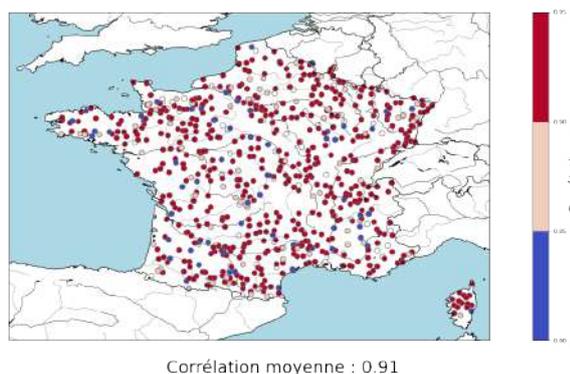


FIGURE 3.13 – Corrélation entre la température de l'air moyennée sur 5 jours et la température de l'eau des rivières pour chaque station

Des différences se manifestent pour certaines stations entre la corrélation obtenue en moyennant la température sur 10 jours et celle obtenue en moyennant sur 5 jours. Ainsi, pour étudier une station particulière en profondeur, il sera nécessaire d'examiner de plus près quelle option est la plus appropriée.

J'ai représenté graphiquement la distribution cumulative des corrélations entre la température de l'eau des rivières et la température de l'air, à la fois en moyenne sur 10 jours et

en moyenne sur 5 jours sur la figure 3.14. En examinant le nombre de stations présentant une corrélation supérieure à 0.95, on observe qu'il y en a 28 lorsque la température de l'air est corrélée à la température de l'eau, 183 lorsque la température de l'air est moyennée sur 10 jours et 239 lorsque moyennée sur 5 jours. Ces résultats suggèrent que, compte tenu de notre réseau d'observations, il serait plus judicieux d'utiliser la température de l'air moyennée sur 5 jours comme approximation de la température de l'eau.

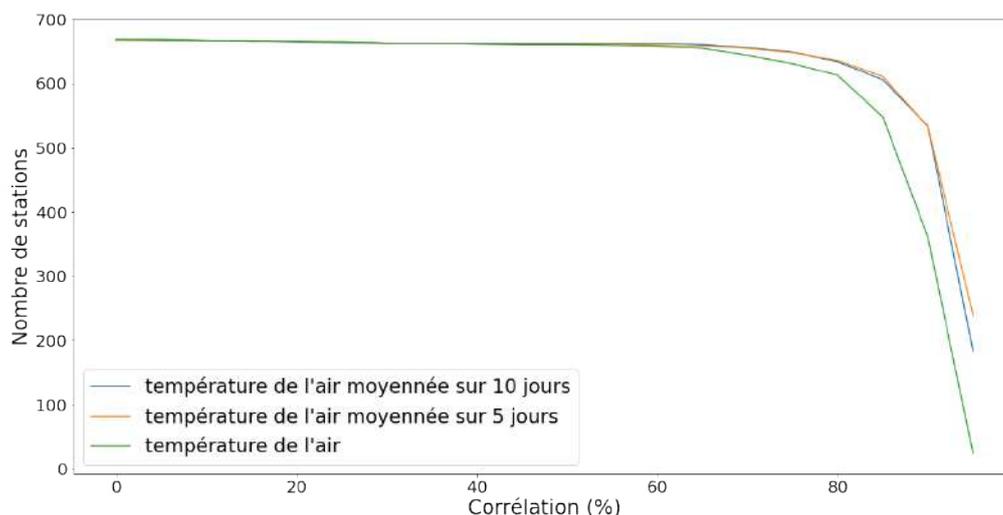


FIGURE 3.14 – Fonction de répartition cumulative des corrélations entre la température de l'eau des rivières et la température de l'air (vert), la température de l'air moyennée sur 10 jours (bleu) et celle moyennée sur 5 jours (orange)

L'établissement d'une corrélation entre la température de l'eau des rivières et celle de l'air pourrait être utilisé pour enrichir notre ensemble de données.

À cette fin, plusieurs approches sont envisageables. L'une d'entre elles consiste à adopter la méthode d'EDF en moyennant la température de l'air sur 10 jours, ou sur une période de 5 jours. Pour une approche plus élaborée, il serait possible de suivre le modèle du projet TIGRE. Dans ce cas, on pourrait étudier chaque station individuellement afin de déterminer sur quelle durée de jours il conviendrait de réaliser la moyenne de la température de l'air, de manière à obtenir la corrélation la plus optimale possible.

4 Modélisation dans CTRIP

4.1 Description de CTRIP

Le modèle CTRIP (Total Runoff Integrated Pathways) est un modèle de rivière initialement développé par [Oki and Sud \[1998\]](#) au Japon, puis repris et amélioré par le CNRM. Il est notamment utilisé pour simuler les écoulements de surface à l'échelle continentale à partir des sorties du modèle de surface ISBA ([Durand et al. \[1993\]](#)).

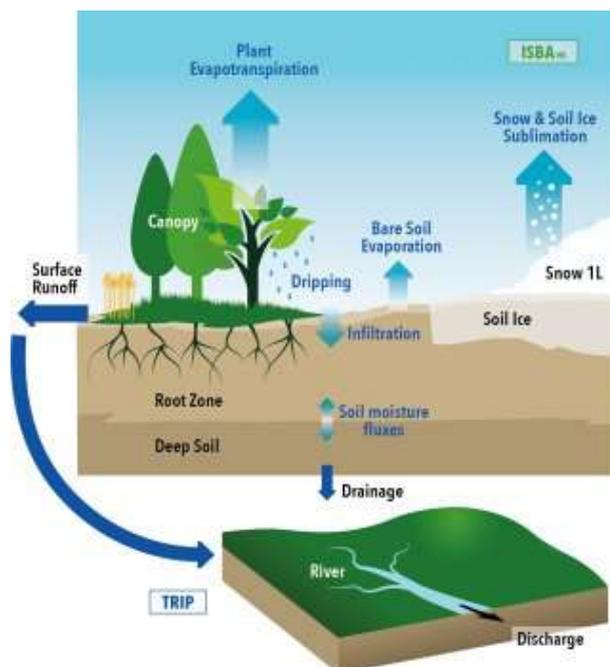


FIGURE 4.1 – Schéma du système de modélisation hydrologique ISBA-TRIP utilisé à la fin des années 2000 pour des applications climatiques et hydrologiques à l'échelle globale d'après [Decharme et al. \[2008\]](#).

Dans CTRIP, la propagation des rivières n'est pas dynamique, c'est un modèle réservoir. Ainsi pour chaque maille, on calcule la masse sortante et on le propage artificiellement dans les mailles aval. Pour estimer la masse d'eau m (kg) dans une maille, on utilise une équation de conservation de la masse, qui nous donne l'évolution temporelle de la masse d'eau dans une maille en fonction du débit entrant dans la maille $Q_{in}(kg/s)$ et du débit sortant de la maille $Q_{out}(kg/s)$,

$$\frac{\partial m}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \quad (3)$$

Le débit entrant $Q_{in}(kg/s)$ est la somme des débits des mailles amonts, du ruissellement et du drainage. Le débit sortant Q_{out} est donné par la masse d'eau dans la maille m , la longueur du tronçon de rivière L et la vitesse d'écoulement que l'on diagnostique grâce à l'équation de Manning, $Q_{out} = \frac{vm}{L}$.

Le modèle utilise un réseau de rivières basé sur les données hydro-géomorphologiques de la base Merit-Hydro à une résolution de $1/12^\circ$ ($8km$) sur la France et de $1/2^\circ$ ($50km$) dans les simulations globales, comme détaillé dans [Munier and Decharme \[2022\]](#).

CTRIP a des applications variées, allant de l'étude des crues et de la prévision des inondations à la gestion des ressources en eau et des études climatiques, contribuant ainsi à mieux comprendre les interactions complexes entre les processus hydrologiques et le climat à l'échelle continentale, et permettant d'améliorer la gestion des ressources hydriques et la prévention des risques liés à l'eau.

4.2 Simplification de l'équation de la température de l'eau

J'ai implémenté une forme plus simple de l'équation de la température de l'eau décrite en introduction (eq. 1). J'ai enlevé le terme énergétique parce qu'il nécessite un couplage avec ISBA trop complexe pour une première approche. Je n'ai donc gardé que le terme d'advection et les flux entrants, ce qui donne :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -V \frac{\partial T}{\partial x} + S \quad (4)$$

Pour faciliter l'intégration de cette équation dans CTRIP, on va suivre le modèle de la conservation de la masse et implémenter l'équation précédente sous la forme d'une équation de conservation de l'énergie écrite en température :

$$\frac{\partial mT}{\partial t} = F_{in} - F_{out} \quad (5)$$

avec $F_{in} = \sum Q_s T_s$ le flux entrant de température, Q_s le débit et T_s la température du ruissellement arrivant dans la rivière; et $F_{out} = Q_{out} T$, le flux sortant de température, Q_{out} le débit sortant et T la température de la rivière.

En discrétisant, on obtient l'équation suivante :

$$\frac{m^{t+1} T^{t+1} - m^t T^t}{dt} = \sum Q_s T_s - Q_{out} T^{t+1} \quad (6)$$

$$T^{t+1} (m^{t+1} + Q_{out} dt) = m^t T^t + \sum Q_s T_s dt \quad (7)$$

$$T^{t+1} = \frac{m^t T^t + \sum Q_s T_s dt}{m^{t+1} + Q_{out} dt} \quad (8)$$

En discrétisant l'équation de conservation de la masse ref et avec $Q_{in} = \sum Q_s$,

$$\frac{m^{t+1} - m^t}{dt} = \sum Q_s - Q_{out} \quad (9)$$

$$m^{t+1} = m^t + \sum Q_s dt - Q_{out} dt \quad (10)$$

en injectant dans l'équation de température :

$$T^{t+1} = \frac{m^t T^t + \sum Q_s T_s dt}{m^t + \sum Q_s dt} \quad (11)$$

C'est cette équation que l'on va implémenter dans le code de CTRIP.

4.3 Implémentation dans le modèle

Le code de CTRIP comprend une centaine de fichiers en fortran 90. Pour implémenter l'équation d'évolution de la température de l'eau dans CTRIP, j'ai codé la température comme une variable pronostique, c'est-à-dire que l'on suit son évolution temporelle. J'ai d'abord commencé par implémenter l'équation avec des flux de température entrants constants, afin de vérifier que la propagation de la température fonctionnait. Cela m'a pris un peu de temps, car j'ai du prendre en main le modèle, comprendre à quoi les différents scripts servaient et les liens entre eux.

Après quelques erreurs de compilation que j'ai résolu, j'ai pu lancer une simulation afin de vérifier que la propagation fonctionnait. J'ai initialisé la température de toutes mes rivières à 15°C et ai mis les températures de ruissellement et de drainage à 5°C. La propagation fonctionnait, on passait d'une température initiale de 15°C à une température finale de 5°C en 9 jours. C'est bien ce à quoi on s'attendait, une baisse de la température de manière assez linéaire jusqu'à atteindre la température des forçages que j'avais fixé.

Ensuite, Bertrand m'a préparé des fichiers de température de ruissellement et de drainage. Les températures de ruissellement ont été calculé dans ISBA via une simulation SIM avec la même configuration que [Le Moigne et al. \[2020\]](#). SIM est la chaîne de modélisation hydrologique opérationnelle de Météo-France qui simule les flux d'eau et d'énergie de surface sur toute la France, ainsi que l'évolution des débits des rivières et des nappes principales. Elle se compose de trois modèles interconnectés :

- SAFRAN : ce système analyse les variables atmosphériques à mésoéchelle près de la surface. Il combine les observations de surface avec les données d'analyse de modèles météorologiques pour produire des paramètres horaires nécessaires au fonctionnement d'ISBA : température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident. Les données sont analysées à intervalles de 300 m d'altitude, puis interpolées sur une grille de calcul régulière de 8 x 8 km.
- ISBA : ce modèle simule les interactions entre le sol, la biosphère et l'atmosphère. Il utilise trois couches de sol dans la chaîne SIM avec différentes températures et simule les flux d'eau entre l'atmosphère (interception, évaporation, transpiration) et le sol (ruissellement et drainage).
- MODCOU : ce modèle hydrologique distribué prend en entrée le ruissellement et le drainage d'ISBA pour calculer l'évolution des nappes et le débit des rivières. Il inclut les nappes de la Seine et du Rhône ainsi que 900 points de simulation pour les débits des rivières. Sa résolution spatiale varie de 1 km à 64 km en fonction des bassins versants et du réseau hydrographique et son pas de temps est de trois heures.

La chaîne SIM est utilisée pour diverses actions de recherche et opérationnelles, notamment pour comprendre le bilan de surface en France, évaluer l'impact du changement climatique sur les débits des rivières et les nappes, prévoir les débits à court et moyen terme, ainsi que pour la prévision saisonnière des ressources hydrologiques.

Dans mon stage pour simuler la température de ruissellement et de drainage via SIM, on a utilisé l'approche de [Wanders et al. \[2019\]](#), i.e. la température du ruissellement de surface est prise égale à la température de l'air plus 1.5° et la température du drainage provenant du sol profond est donnée par la température de la dernière couche de sol.

J'ai raccordé les fichiers de forçage au code de CTRIP, et j'ai pu lancer une autre simulation, cette fois à forçages non constants. La figure 4.2 montre les résultats de la simulation pour les

échéances 1, 7, 14, 21, 28 et 35 jours.

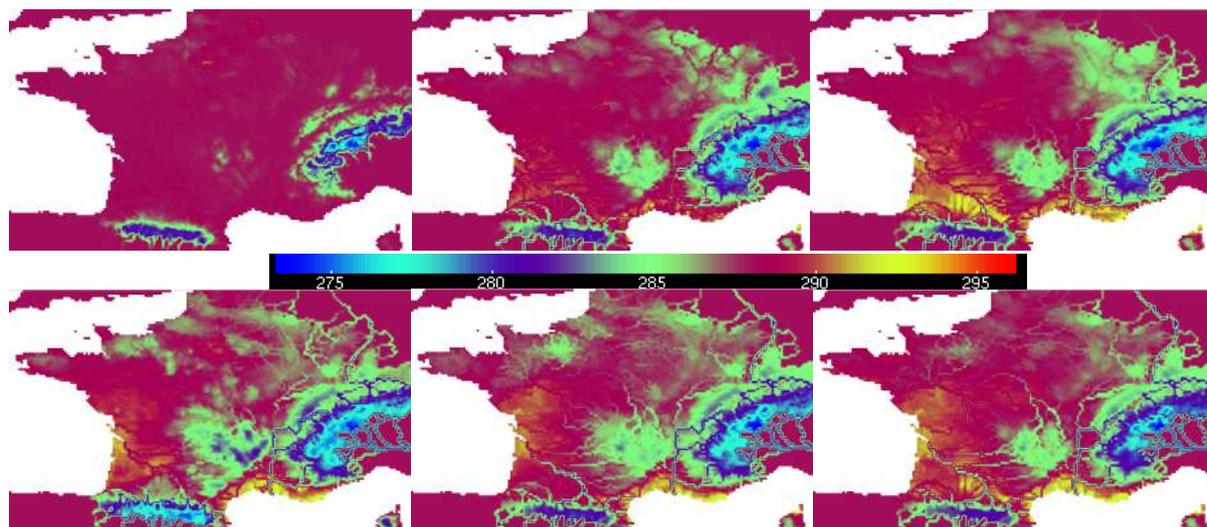


FIGURE 4.2 – Carte des températures de l'eau (K) pour une température initiale de 288K, à 1, 7, 14, 21, 28 et 35 jours.

Enfin, j'ai codé la température des ruissellements et du drainage comme des variables diagnostiques, afin de pouvoir plus facilement comprendre à quoi étaient dues les variations de température dans le mélange et vérifier que nos résultats étaient cohérents.

5 Comparaison observations vs modèle

Nos observations commencent le 1er janvier 2006 et se terminent en 2022, et la simulation que j'ai lancée commence le 1 août 2005 et finit le 31 juillet 2017. Ainsi, nous allons comparer le modèle et les observations sur la période du 1er janvier 2006 au 31 juillet 2017. Nous allons utiliser des données journalières pour faire nos comparaisons, des données horaires apporteraient trop de détail, ce qui n'est pas nécessaire ici puisque nous n'allons pas étudier le cycle diurne de la température de l'eau des rivières.

On s'attend à avoir des biais de notre modèle par rapport aux observations, puisque nous ne prenons pas en compte les échanges énergétiques qui ont lieu aux interfaces eau/air et eau/sol de la rivière. Ces biais seront sûrement importants en été et en aval des rivières, où les échanges énergétiques sont importants. Par ailleurs, la température des petits cours d'eau dépend énormément des conditions géographiques et géomorphologiques de l'environnement de la rivière (Beaufort [2015]), notre modèle ne sera certainement pas très bon dans ce cas puisqu'il ne prend en compte que le mélange. Enfin, j'ai initialisé toutes les rivières du territoire à 15°C ce qui n'est pas réaliste, et peut induire des erreurs dès le départ. On peut tout de même espérer avoir un cycle annuel des températures de l'eau des rivières, qui serait induit par la température du drainage et des ruissellements.

5.1 Comparaison sur des stations précises

Un algorithme automatique a été développé et est utilisé au CNRM pour comparer les observations de débit au modèle, mais nous n'avons pas eu le temps de l'adapter afin de comparer les observations de température de l'eau au modèle. J'ai donc choisi d'étudier quelques stations sur la France métropolitaine.

Pour les choisir, j'ai relevé les coordonnées des stations de mon réseau d'observations qui avaient le plus de données sur le réseau CTRIP au 1/12° (fig. 5.1) à la main. Avec les coordonnées, j'ai pu sélectionner les données d'une maille précise dans mes sorties modèle. J'ai du prendre des stations qui étaient suffisamment grandes pour être sûre qu'elles reçoivent du ruissellement ou du drainage.



FIGURE 5.1 – Réseau CTRIP au 1/12°

Par exemple, à Oberbronn sur la Zinsel du Nord, comme on peut le voir sur la figure 5.2, il n’y a pas d’évolution de la température de la rivière parce que pas de ruissellement ou de drainage qui arrive dans la maille. Malgré son nombre élevé de données, on ne pourra pas exploiter cette station.

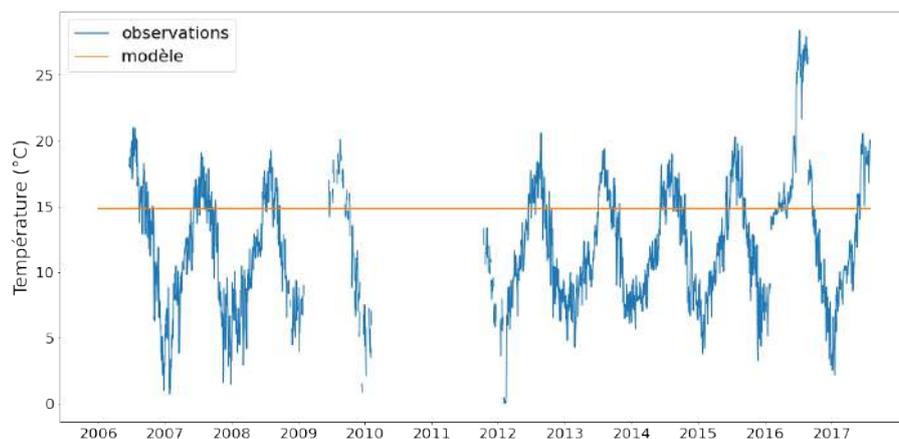


FIGURE 5.2 – Comparaison observations (bleu) vs. modèle (orange) sur la rivière de la Zinsel Oberbronn

En revanche, sur des rivières plus grandes, comme sur l’Arc à Aix en Provence (fig. 5.3) ou sur l’Ardèche à Vogüe (fig. 5.4), on a bien une évolution de la température de l’eau. Ces résultats sont assez satisfaisants car on voit bien le cycle annuel des températures. On retrouve des différences entre le modèle et les observations notamment en hiver à Aix-en-Provence et en été et en hiver à Vogüe. Il faut garder en tête que les observations de température de l’eau peuvent aussi être inexactes. En effet, d’après les observations, l’Arc gèlerait tous les hivers, ce qui paraît étonnant pour une rivière à Aix-en-Provence.

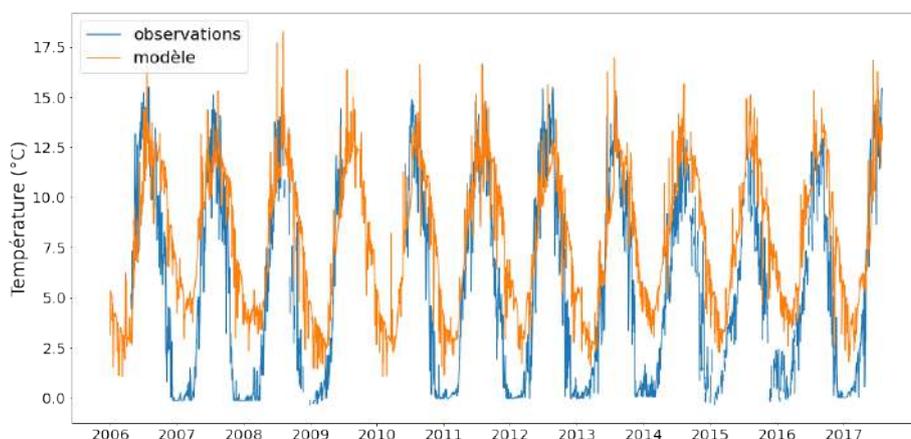


FIGURE 5.3 – Comparaison observations (bleu) vs. modèle (orange) sur la rivière de l’Arc à Aix-en-Provence

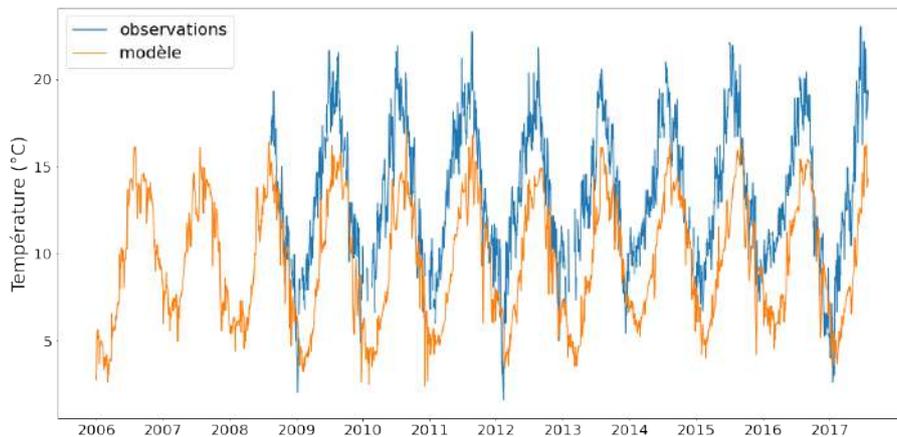


FIGURE 5.4 – Comparaison observations (bleu) vs. modèle (orange) sur la rivière de l’Ardèche à Vogüe

Enfin, pour étudier la période dans sa globalité, j’ai voulu comparer les cycles annuels des données d’observation et des données du modèle. Pour cela, j’ai tracé la figure 5.5.

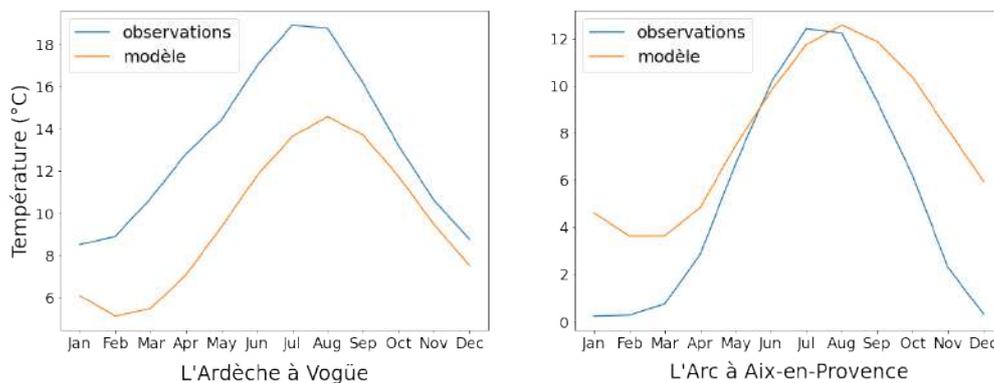


FIGURE 5.5 – Comparaison du cycle annuel des observations (bleu) vs. modèle (orange) sur les rivières de l’Ardèche à Vogüe et de l’Arc à Aix-en-Provence

On remarque que les cycles ne sont pas tout à fait superposés, que ce soit pour ces stations ou pour d’autres que je n’ai pas montré ici. On a souvent un décalage du cycle annuel d’environ 1 mois, ce qui peut être dû à l’absence d’échanges énergétiques dans notre modèle. En effet, sans ces échanges, la température de l’eau augmente seulement grâce au mélange avec d’autres masses d’eau, ce qui peut induire une certaine inertie d’évolution de la température de l’eau.

5.2 Comparaison globales

Afin d’avoir une vue plus globale sur nos données, j’ai voulu comparer les distributions de température de l’eau issues du modèle et des observations sur la figure 5.6. On observe un cycle annuel moins marqué avec les données du modèle et des températures plus basses. Cela

peut s'expliquer par l'absence de flux énergétiques et notamment de rayonnement solaire, qui est la principale source d'augmentation de la température de l'eau des rivières.

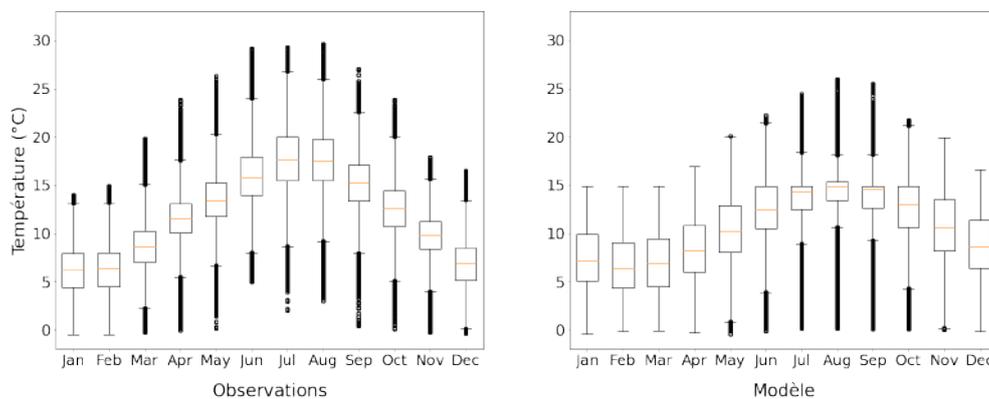


FIGURE 5.6 – Boxplot mensuels des données de température de l'eau avec à gauche les données d'observation et à droite les données modèle.

6 Conclusions

Les rivières jouent un rôle vital dans les écosystèmes aquatiques et ont des implications majeures pour l'environnement et la société. Les températures de l'eau des rivières sont influencées par divers facteurs, tels que le changement climatique, les activités humaines et les modifications des régimes hydrologiques. Comprendre ces variations est essentiel pour garantir la santé des écosystèmes, la biodiversité et la gestion des ressources en eau.

La préparation et l'analyse des données d'observations relatives à la température de l'eau ont joué un rôle crucial dans la mise en place de l'intégration de ce paramètre dans le modèle ISBA-CTRIP. Ce processus a permis de créer une base solide pour la validation et l'utilisation ultérieure du modèle, tout en mettant en évidence les défis et les nuances associés à la gestion de données réelles pour une application scientifique.

La récupération des données à partir de la banque de données Naiades a fourni un ensemble de mesures semi-horaires de température de l'eau provenant de nombreuses stations en France métropolitaine. Cependant, ces données présentaient de nombreuses valeurs aberrantes et lacunes, ce qui vient renforcer le besoin de modélisation des températures des cours d'eau. Le filtrage des données a été une étape cruciale pour assurer la qualité des observations et permettre une comparaison cohérente avec les résultats du modèle. La mise en forme des données horaires en fichiers NetCDF, ainsi que leur transformation en données journalières et mensuelles moyennées, a permis de créer une base de données plus gérable et plus facile à analyser. Les filtres appliqués aux données horaires ont permis d'éliminer les valeurs aberrantes, tout en préservant l'essence des variations saisonnières de la température de l'eau des rivières.

L'analyse des climatologies a montré que les températures de l'eau présentent des variations saisonnières typiques, avec des températures plus froides en hiver et plus chaudes en été. Les saisons intermédiaires, le printemps et l'automne, ont également été identifiées, avec une légère différence de température entre elles. Ces variations saisonnières sont cohérentes avec les changements saisonniers attendus. En ce qui concerne les tendances temporelles, malgré les limitations liées aux données manquantes, des tendances significatives ont été identifiées dans certaines stations. Une augmentation générale des températures de l'eau a été observée, en particulier lorsque l'on considère des périodes plus longues et des séries de données plus cohérentes. Cette observation s'accorde avec les préoccupations concernant le changement climatique et ses effets sur les températures des cours d'eau. L'étude des corrélations entre les températures de l'eau des rivières et les températures de l'air a révélé une forte corrélation entre ces deux paramètres, que la moyenne de la température de l'air se fasse sur 10 jours ou sur une période de 5 jours. Ces corrélations offrent la possibilité d'utiliser la température de l'air comme approximation de la température de l'eau, ce qui pourrait être particulièrement utile dans les régions où les données de température de l'eau sont rares ou inexistantes.

Cette étude apporte des éclairages importants sur les variations thermiques des rivières en France métropolitaine, ainsi que sur les relations entre les températures de l'eau et de l'air. Néanmoins, il est important de garder à l'esprit que notre étude se base sur un jeu de données très lacunaire, et cela peut avoir un impact sur la représentativité de nos résultats. Une analyse avec un jeu de données plus complet pourrait fournir des informations plus robustes et plus nuancées sur les variations de températures de l'eau.

L'équation d'évolution de la température des cours d'eau dans le modèle CTRIP a été implémentée sous forme d'une équation de conservation de l'énergie écrite en termes de tempé-

rature. Après des tests initiaux avec des flux de température entrants constants, les simulations ont été étendues à des forçages temporellement variables, avec l'introduction des températures de ruissellement et de drainage obtenues à partir de la chaîne hydrologique opérationnelle SIM.

Les résultats des comparaisons pour certaines stations ont montré des similitudes satisfaisantes entre les données du modèle et les observations. Ces stations ont révélé des cycles annuels de température de l'eau cohérents entre le modèle et les observations, avec tout de même un léger décalage du modèle par rapport aux observations.

Cette étude s'est penchée sur l'analyse des températures de l'eau des rivières en France métropolitaine, en utilisant une approche combinée de données d'observation in-situ et de modélisation basée sur le modèle CTRIP. Elle nous a permis de mieux comprendre l'évolution des températures à différentes échelles temporelles. Enfin, le prototype de modélisation de température que j'ai mis en place dans CTRIP devra évoluer vers une approche encore plus physique (bilan d'énergie complet, etc.) pour arriver à bien représenter les observations.

Références

- Aurelien Beaufort. *Modélisation physique de la température des cours d'eau à l'échelle régionale : application au bassin versant de la Loire*. PhD thesis, 2015. URL <http://www.theses.fr/2015TOUR4003>. Thèse de doctorat dirigée par Moatar-Bertrand, Florentina et Curie, Florence Géosciences environnement Tours 2015.
- Aurélien Beaufort, Florentina Moatar, Eric Sauquet, Pierre Loicq, and David M. Hannah. Influence of landscape and hydrological factors on stream–air temperature relationships at regional scale. *Hydrological Processes*, 34(3) :583–597, 2020a. doi:<https://doi.org/10.1002/hyp.13608>. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.13608>.
- Aurélien Beaufort, Florentina Moatar, Eric Sauquet, and Claire Magand. Thermie en rivière : Analyse géostatistique et description de régime : Application à l'échelle de la France. Research report, INRAE, Aug 2020b. URL <https://hal.science/hal-03126527>.
- D. Caissie. The thermal regime of rivers : a review. *Freshwater Biology*, 51(8) :1389–1406, 2006. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>.
- B. Decharme, H. Douville, C. Prigent, F. Papa, and F. Aires. A new river flooding scheme for global climate applications : Off-line evaluation over south america. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 113(D11), 2008. doi:[10.1029/2007JD009376](https://doi.org/10.1029/2007JD009376). URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2007JD009376>.
- Stephen J. Dugdale, David M. Hannah, and Iain A. Malcolm. River temperature modelling : A review of process-based approaches and future directions. *Earth-Science Reviews*, 175 :97–113, Dec 2017. doi:[10.1016/j.earscirev.2017.10.009](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.10.009). URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0012825217300417>.
- Y. Durand, E. Brun, L. Merindol, G. Guyomarc'h, B. Lesaffre, and E. Martin. A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of Glaciology*, 18 :65–71, 1993. doi:[10.3189/S0260305500011277](https://doi.org/10.3189/S0260305500011277). URL https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0260305500011277/type/journal_article.
- David M. Hannah and Grace Garner. 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, 2015. doi:[10.1177/0309133314550669](https://doi.org/10.1177/0309133314550669). URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0309133314550669>.
- P. Le Moigne, F. Besson, E. Martin, J. Boé, A. Boone, B. Decharme, P. Etchevers, S. Faroux, F. Habets, M. Lafaysse, D. Leroux, and F. Rousset-Regimbeau. The latest improvements with surfex v8.0 of the safran–isba–modcou hydrometeorological model for France. *Geoscientific Model Development*, 13(9) :3925–3946, 2020. doi:[10.5194/gmd-13-3925-2020](https://doi.org/10.5194/gmd-13-3925-2020). URL <https://gmd.copernicus.org/articles/13/3925/2020/>.
- S. Munier and B. Decharme. River network and hydro-geomorphological parameters at 1/12° resolution for global hydrological and climate studies. *Earth System Science Data*, 14(5) : 2239–2258, 2022. doi:[10.5194/essd-14-2239-2022](https://doi.org/10.5194/essd-14-2239-2022). URL <https://essd.copernicus.org/articles/14/2239/2022/>.

Taikan Oki and Y. C. Sud. Design of total runoff integrating pathways (trip)—a global river channel network. *Earth Interactions*, 2(1) :1 – 37, 1998. doi:[https://doi.org/10.1175/1087-3562\(1998\)002<0001 :DOTRIP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(1998)002<0001 :DOTRIP>2.3.CO;2). URL https://journals.ametsoc.org/view/journals/eint/2/1/1087-3562_1998_002_0001_dotrip_2.3.co_2.xml.

Valerie Ouellet and Daniel Caissie. 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, 2023. doi:[10.1080/07011784.2023.2177196](https://doi.org/10.1080/07011784.2023.2177196). URL <https://doi.org/10.1080/07011784.2023.2177196>.

Niko Wanders, Michelle T. H. van Vliet, Yoshihide Wada, Marc F. P. Bierkens, and Ludovicus P. H. (Rens) van Beek. High-resolution global water temperature modeling. *Water Resources Research*, 55(4) :2760–2778, 2019. doi:[10.1029/2018WR023250](https://doi.org/10.1029/2018WR023250). URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018WR023250>.

