



Mémoire présenté par : JOET Océane

En vue de l'obtention d'un Master en Prévention et gestion des altérations de l'environnement (PGAE), parcours Integrated Watershed Science (IWS), à l'Université Jean Monnet, Saint-Etienne et H2O'Lyon.

Encadré par : Moatar Florentina et Valette Laurent

Date de soutenance : 06/2025

PARAMÉTRISATION DE LA VÉGÉTATION RIVULAIRE DANS LA MODÉLISATION À BASE PHYSIQUE DE LA TEMPÉRATURE DES RÉSEAUX HYDROGRAPHIQUES : APPLICATION AUX RIVIÈRES DU DÉPARTEMENT DE LA LOIRE (42)



RESUME

Dans un contexte de changement climatique, la température de l'eau est un paramètre déterminant dans le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques, ainsi qu'un enjeu majeur pour les usages humains liés à la qualité de l'eau et à la disponibilité de la ressource. L'élévation de la température de l'air et l'intensification des épisodes de chaleur participent au réchauffement des cours d'eau, rendant nécessaire la mise en œuvre de mesures d'atténuation. Dans ce cadre, la modélisation des températures des cours d'eau apparaît comme un outil essentiel pour comprendre les dynamiques thermiques et les impacts des changements environnementaux. Au sien des leviers d'action possible, la végétation riveraine, grâce à son effet d'ombrage, peut contribuer à réduire la hausse des températures en atténuant le rayonnement solaire reçu par l'eau. Cette étude a pour objectifs de (1) évaluer si une meilleure prise en compte de la végétation améliore les performances du modèle T-NET dans la simulation des températures de l'eau et (2) analyser l'impact de la densité et des discontinuités du couvert végétal sur l'ombrage et par conséquent, sur la température de l'eau. Pour cela, une méthode de caractérisation fine de la végétation, basée sur des données altimétriques (MNT/MNS), a été testée et a permis d'accroître la précision des simulations sur le bassin étudié.

Des scénarios de gestion/restauration ont été simulés, confirmant l'importance de la végétation riveraine dans la régulation thermique. Un scénario de couverture unilatérale s'est révélé être un bon compromis entre faisabilité de gestion et réduction des températures pour une journée estivale. Par ailleurs, une approche exploratoire, reposant sur des capteurs mis en place sur plusieurs sites, tend à montrer que même de courtes interruptions de la végétation peuvent entraîner des hausses localisées de la température.

In a context of climate change, water temperature is a determining parameter in the proper functioning of aquatic ecosystems, as well as a major issue for human uses linked to water quality and resource availability. Rising air temperatures and the intensification of hot spells are contributing to the warming of watercourses, making it necessary to implement mitigation measures. In this context, river temperature modelling is an essential tool for understanding thermal dynamics and the impact of environmental change. Among the possible levers of action, riparian vegetation, thanks to its shading effect, can help reduce temperature rises by attenuating the solar radiation received by the water. The aims of this study are (1) to assess whether taking better account of vegetation improves the performance of the T-NET model in simulating water temperatures, and (2) to analyze the impact of plant cover density and discontinuities on shading and, consequently, on water temperature. To this end, a method of fine characterization of vegetation, based on altimetry data (MNT/MNS), was tested and enabled to increase the accuracy of simulations on the basin studied.

Management/restoration scenarios were simulated, confirming the importance of riparian vegetation in thermal regulation. A one-sided cover scenario proved to be a good compromise between management feasibility and temperature reduction for a summer day. In addition, an exploratory approach, based on sensors installed at several sites, tends to show that even short interruptions in vegetation can lead to localized temperature rises.

Mots clés : Ombrage, Scénario de restauration, ripisylve, température de l'eau, gestion

Key words: Shading, restoration scenario, riparian vegetation, water temperature, management

TABLE DES MATIERES

1	Introduction.....	10
1.1	Contexte générale du projet.....	10
1.2	Réchauffement des cours d'eau et mécanismes d'atténuation	10
1.3	Restaurer la végétation face au changement climatique	12
1.4	Objectifs de l'étude.....	13
2	Matériel et méthode	14
2.1	Présentation des sites d'étude	14
2.2	Méthode générale	18
2.3	Fonctionnement du modèle t-net et intégration initiale de la végétation riveraine à partir de BD TOPO®	19
2.3.1	Comment le modèle T-NET fonctionne ?	19
2.3.2	Caractérisation initiale de la végétation à l'aide de la BD TOPO®	19
2.3.3	Les limites de la méthode et comparaison entre les différentes versions du modèle T-NET	20
2.4	Evaluation de la performance du modèle t-net : comparaison des simulations basées sur le BD TOPO® avec les températures mesurées et analyse des effets des paramètres d'entrée	20
2.5	De la BD TOPO® aux données altimétriques MNT/MNS : une nouvelle approche pour une caractérisation plus détaillée de la végétation dans T-NET	21
2.5.1	Harmonisation des réseaux hydrographique pour l'intégration dans le modèle T-NET	22
2.5.2	Génération de la couche de hauteurs de la végétation à partir des couches MNS et MNT	23
2.5.3	Délimitation de la zone tampon autour des cours d'eau et extraction de la hauteur et de la densité de végétation	23
2.6	Comparaison et analyses des différences de performances du modèle T-NET avant et après l'intégration des nouveaux paramètres de végétation.....	25
2.7	Evaluation des scénarios de gestion de la végétation	26
2.7.1	Sensibilité du modèle à la variation de la végétation.....	26
2.7.2	Scénario de restauration ciblée de la végétation sur les rives sud	26
2.8	Expérimentation à plus petite échelle : effets locaux de la végétation riveraine sur l'ombrage et la température de l'eau.....	27
3	Résultats	28
3.1	Analyse de l'évolution des températures simulées par le modèle T-NET avec les paramètres initiaux (BD TOPO®).....	28
3.1.1	Simulation de l'évolution historique des températures dans les bassins étudiés : analyse des résultats de l'étude de Seyedhashemi et al. (2023)	28
3.1.2	Comparaison des simulations : ancienne et nouvelle version du modèle T-NET.....	30

3.1.3	Évaluation des performances du modèle T-NET (ancienne et nouvelle versions) avec paramétrage initial de la végétation basé sur BD TOPO® : Simulation vs. Données mesurées	30
3.1.4	Analyse de l'influence des paramètres en entrée du modèle sur les performances	33
3.2	Impact de la nouvelle caractérisation de la végétation sur les paramètres de hauteur et de densité : paramétrage initial basé sur BD TOPO® et approche basée sur la différence MNS-MNT..	34
3.2.1	Comparaison des paramètres de la densité de végétation	34
3.2.1.1	Comparaison des paramètres de la hauteur de végétation	35
3.3	Analyses comparatives des performances du modèle T-NET selon les différentes méthodes de caractérisation des paramètres de la végétation	35
3.3.1	Comparaison des performances entre les simulations	36
3.3.2	Analyse de l'influence des paramètres en entrée du modèle sur les différences de performances	37
3.4	Scénarios de restauration : Evaluation de l'impact de la végétation sur la température de la rivière	38
3.4.1	Description de la distribution de la végétation pour les différents scénarios	38
3.4.2	Sensibilité du modèle au changement de la couverture de la végétation	40
3.4.3	Impact des scénarios de gestion/restauration sur la température simulée	41
3.5	Analyses à l'échelle locale des impacts de la végétation sur la luminosité et la température	44
3.5.1	Evolution de l'intensité lumineuse selon les types de couvertures végétales	44
3.5.2	Impact des zones non ombragées sur la température de l'eau	46
4	Discussion	49
4.1	Sensibilité thermique locale et limites de la modélisation	49
4.2	Avantages et limites de la nouvelle méthode de caractérisation de la végétation	50
4.3	Optimiser les performances du modèle t-net en caractérisant mieux le couvert végétal..	50
4.4	Scénarios de restauration : quel sont les leviers efficaces pour limiter le réchauffement des rivières ?	51
4.5	Analyses à l'échelle locale	52
4.6	Implication opérationnelle pour la gestion des cours d'eau	53
5	Conclusion	54

FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1 : Diagramme illustrant les différents processus d'échange agissant sur un tronçon de cours d'eau, (issue de (Leach et al., 2023)).	11
Figure 2 : Variabilité spatiale de la température moyenne estivale de l'eau (Tw) dans la simulation rétrospective couvrant la période 1963–2019, ainsi que dans les projections réalisées avec l'ensemble des modèles climatiques globaux et régionaux (GCMs–RCMs) sous le scénario RCP 8.5 pour le milieu du siècle (2040–2069). Figure issue de l'étude Seyedhashemi et al. (2023).	12
Figure 3 : Localisation des sites d'études dans le bassin versant de la Loire et des stations de mesure de température in situ. Les stations issues de la Fédération de Pêche 42 (en rouge), disposent de données collectées entre 2009 et 2022. Les stations de l'INRAe (en jaune), issue de l'étude Diamond et al. (2022), disposent de données collectées pour les années 2019-2020	15
Figure 4 : Localisation des sites sélectionnés pour une étude à l'échelle locale de la température et de l'intensité lumineuse par rapport à des situations contrastées en termes de densité et de présence ou d'absence de végétation riveraine.	17
Figure 5 : Représentation des concepts de Modèle numérique de Terrain (MNT) et de Modèle Numérique de Surface (MNS), Source : geoservices.ign.fr	21
Figure 6 : Comparaison et harmonisation des tracés hydrographiques entre la BD TOPO (en gris avant traitement, en orange après suppression des éléments non pris en compte dans le réseau T-NET) et le réseau T-NET (en bleu). Les centroïde de chaque tronçon sont représentés par des point (orange : BD TOPO, bleu : T-NET) est assure la correspondance des identifiants T-NET.	22
Figure 7 : Hauteur de la végétation estimée par la différence entre le Modèle Numérique de Surface (résolution 0,5 m) et le Modèle Numérique de Terrain (résolution 1m) sur le bassin versant du Lignon, avec deux seuils de détection de la végétation : végétation au-dessus de 2 m (en rouge) et au-dessous de 5 m (en vert).	23
Figure 8 : Hauteur estimée de la végétation, calculée par la différence entre le Modèle Numérique de Surface (résolution 0,5 m) et le Modèle Numérique de Terrain (résolution 1 m), avec un seuil de détection de la végétation au-dessus de 2 m. Les polygones correspondent aux zones tampons de 10m pour chaque rive (rive droite : en pointillé ; rive gauche : trait plein) du cours d'eau utilisés pour extraire les paramètres de densité et hauteur moyenne de végétation nécessaire au modèle T-NET.	24
Figure 9 : Hauteur moyenne de la végétation (en mètres), estimée par unités spatiales de 10 m de largeur le long des berges du cours d'eau du Lignon. Les hauteurs ont été obtenues par différence entre le Modèle Numérique de Surface (MNS, résolution 0,5 m) et le Modèle Numérique de Terrain (MNT, résolution 1 m).	25
Figure 10 : Site du Garollet, affluent en rive droite de la Loire, avec la localisation des trois points de mesure. Chaque point est équipé d'une sonde conductimètre (température de l'eau), d'un luxmètre (luminosité) et d'un capteur de température de l'air. Les emplacements sont répartis selon la structure de la végétation : VD (végétation dense), VP (végétation partielle) et SV (sans végétation).	27
Figure 11 : Evolution de la température moyenne décennale de l'eau entre 1963-2019, simulée par le modèle T-NET dans l'étude de Seyedhashemi et al. (2023), pour les affluents de la rive droite (en rouge) et de la rive gauche (en bleu) de la Loire.	28
Figure 12 : Exemple de l'évolution annuelle de la température moyenne estivale (juin, juillet, août) par année pour un tronçons T-NET (Identifiant : 4209), utilisée pour estimer l'échauffement par décennie. La pente de la droite de régression linéaire représente le taux d'échauffement annuel de la température.	29
Figure 13 : Distribution des échauffements décennaux pour la période annuelle (en vert) et estivale (juin, juillet, août) (en rouge) de l'eau simulée par le modèle T-NET dans l'étude de Seyedhashemi et	

al. (2023), selon l'ordre de Stralher, pour les affluents de la rive droite et de la rive gauche de la Loire. n = le nombre de tronçon par ordre de Stralher.....	29
Figure 14 : A = Ecart médians entre les températures simulées provenant de l'étude Seyedhashemi et al. (2023) et celles simulées par la version actuelle du modèle T-NET, pour la période estivale (juin, juillet, août) entre 2008 et 2019. B = Evolution des températures simulées par l'étude Seyedhashemi et al. (2023) (en bleu) et par la version actuelle du modèle T-NET (en rouge) au cours de l'année 2017 pour un tronçon de réseau T-NET.	30
Figure 15 : Comparaison des températures de l'eau simulées par le modèle T-NET (en bleu) et mesurées (en rouge) pour différentes stations du bassin versant de la Loire au cours de l'été 2020 (juin, juillet).....	31
Figure 16 : Distribution des erreurs de simulation (RMSE) et du biais pour le modèle initial T-NET, basé sur la BD Topage, dans les sous-bassins versant de la Loire (stations RiverLy) et du Lignon (Stations Fédération de Pêche 42) en période estivale (juin, juillet, août).	32
Figure 17 : Comparaison des méthodes de caractérisation de la densité de végétation : méthode initiale basée sur BD TOPO® (en gris clair) et nouvelle méthode basée sur la différence MNS-MNT avec deux seuils de détection de la végétation > 2 m en gris et > 5 m en gris foncé, pour les affluents rive gauche (ARGL) et rive droite (ARDL) de la Loire.	34
Figure 18 : Comparaison des méthodes de caractérisation de la hauteur de végétation : méthode initiale basée sur BD TOPO® (en gris clair) et nouvelle méthode basée sur la différence MNS-MNT avec deux seuils de détection de la végétation > 2 m en gris et > 5 m en gris foncé), pour les affluents de la rive gauche (ARGL) et les affluents de la rive droite de la Loire (ARDL).	35
Figure 19 : Régression entre les erreurs (RMSE) des températures simulées et mesurées pour les stations des bassins du Lignon (cercles) issue de la Fédération de Pêche 42 et de la Loire (triangles) issue de INRAE RiverLy, selon la méthode initiale (BD Topage) et la nouvelle méthode (MNT-MNS) avec l'application de deux seuils de détection de la végétation (>2 m et > 5 m).	36
Figure 20 : Localisation des tronçons sélectionnés pour le scénario de restauration de la végétation ciblant les rives sud. Les tronçons ont été identifiés à partir du réseau T-NET en considérant une orientation comprise entre 22.5° et 157.5° pour les rives droites, et comprise 202.5 et 337.5°, pour les rives gauches. Seuls les tronçons présentant une densité de végétation initiale inférieure à 60% dans le modèle T-NET ont été retenus.....	38
Figure 21 : Répartition du pourcentage de densité de végétation en rive gauche et droite de la simulation initiale basée sur la BD Topage (en bleu) et du scénario ciblant les rives sud (en rouge), selon les ordres de Strahler et en fonction du bassin versant.....	39
Figure 22 : Régression entre les erreurs (RMSE) issues des températures de l'eau simulées et mesurées pour les stations des bassins du Lignon (cercles, issue de INRAE RiverLy) et de la Loire (triangles, issue de la Fédération de Pêche 42), selon la simulation initiale avec un paramètre de densité de végétation basé sur la BD Topage et les scénarios de densité de végétation à 0 % et à 100%.	40
Figure 23 : Cartographie de la température de l'eau simulée pour le 28 août 2018 en fonction de différents scénarios de densité de végétation avec A = Simulation de la température la densité de végétation initiale, B = Scénarios de densité 100% pour tous les tronçons, C = Scénario de rive sud ou la densité de végétation de 100% sur les rives sud et D = Scénario 0% la densité de végétation est de 0 % pour tous les tronçons.....	41
Figure 24 : Distribution des différences de température de l'eau entre les tronçons selon différents scénarios de restauration de la végétation riveraine avec : suppression totale de la végétation (paramètre de densité fixé à 0 %)(bleu) ; restauration maximale de la végétation sur les deux berges (densité fixée à 100 %)(orange) et restauration ciblée sur la rive sud uniquement (densité fixée à 100 % pour les tronçons avec densité initiale < 60 %)(vert), pour la journée d'été du 28 août 2018.....	42

Figure 25 : Evolution des écarts de température simulée par le modèle T-NET le long des drains principaux des bassins versant pour la journée du 28 Août 2018 entre la simulation avec les paramètres de densité de végétation initiales (BD Topage) et les scénarios de densité de végétation à 0 % à 100% et ciblant les rives sud avec une densité initiale inférieure à 60%.....	43
Figure 26 : Evolution temporelle de l'intensité lumineuse sur le site de Charpassonne en fonction du type de couvert végétal (dense (bleu), partiel (vert) ou absent (rouge)).	44
Figure 27 : Comparaison des variations d'intensité lumineuse en fonction du type de couvert végétal (dense, partiel, absent) sur les sites de Garollet, Lignon, Vizézy et Charpassonne, sur la période commune du 4 mars au 3 avril 2025.	45
Figure 28 : Emplacement des sondes de température (cercle blanc) et découpage du linéaire en fonction du couvert végétal riverain, avec une section du cours d'eau bordée de végétation d'environ 400 m de long (orange), suivie d'une zone sans végétation d'environ 160 m de long (rouge), puis d'une nouvelle section où la végétation riveraine est à nouveau présente (vert). Le sens d'écoulement est indiqué par la flèche noire.	46
Figure 29 : Evolution de la température de l'eau mesurée par des sondes thermiques en amont et en aval des zones sans végétation, sur une distance d'environ 180 m pour le site de Charpassonne (A) et 176 m pour le site de Garollet (B), sur la période commune du 1er avril au 5 mai 2025.	47
Figure 30 : Evolution des températures horaires moyennes de l'eau entre le 4 mars et le 3 avril 2025, en fonction du type de couverture végétale (absente (rouge), partielle (bleue) et dense (verte)) sur les sites de Charpassonne, Graollet, Vizézy et Lignon.	47
Tableau 1 : Caractéristique des sous bassins versant de l'étude	14
Tableau 2 : Caractéristiques des stations de mesure de la température de l'eau de la 42ème fédération de pêche et de l'INRAE (RiverLy)	16
Tableau 3 : Résumer des relations significatives entre l'erreur (RMSE) de la simulation des températures du modèle initial T-NET et les températures mesurées aux stations disponibles dans le bassin de la Loire (issue de INRAe RiverLy sur la période 2019-2020) et dans le bassin du Lignon (issue de la Fédération de Pêche 42, sur la période 2009-2022) entre les paramètres en entrée du modèle T-NET. Les paramètres de hauteur de végétation et de densité ont été intégrés en fonction des rives droite et gauche des tronçons. Seules les corrélations significatives ont été conservées dans ce tableau.	33
Tableau 4 : Résumé des médianes de l'erreur (RMSE) des différentes simulations du modèle T-NET : la méthode initiale, qui se base sur la BD Topage et la nouvelle méthode qui se base sur la différence entre le MNS-MNT avec l'application de deux seuils de détection (> 2 m et > 5 m), sur le bassin versant du Lignon et de la Loire.	36
Tableau 5 : Résumer les relations significatives entre les différences d'erreur (RMSE) des simulations de température obtenues avec le modèle T-NET selon deux approches : l'une basée sur la BD TOPO® et l'autre basée sur la différence MNS-MNT, avec deux seuils de détection de la végétation (>2 m et >5 m) et les paramètres d'entrée du modèle.	37
Tableau 6 : Résumé des médianes de l'erreur (RMSE) des différentes simulations du modèle T-NET, un paramètre de densité de végétation initiale (basé sur la BD Topage) et les scénarios de densité de végétation à 0 % et à 100%.	40
Tableau 7 : Analyse comparative des impacts des stratégies de gestion de la ripisylve sur la température de l'eau modélisée (journée estivale du 28 août 2018).	41

LISTE DES ACRONYMES

MTN = Modèle Numérique de Terrain

MNS = Modèle Numérique de Surface

ARDL = Affluents Rives Droite de la Loire

ARGL = Affluents Rives Gauches de la Loire

1 INTRODUCTION

L'intérêt pour la gestion de la végétation rivulaire, également appelée ripisylve, est en plein essor dans un contexte d'adaptation au changement climatique et de préservation des milieux aquatiques et de la ressource en eau. Cette introduction présente le cadre, les enjeux et les objectifs de l'étude, qui s'inscrit dans un projet plus large à l'échelle du SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) du département de la Loire.

1.1 CONTEXTE GENERALE DU PROJET

Le projet actuel est proposé par le département de la Loire. Plusieurs indicateurs sont actuellement utilisés au niveau du SAGE pour caractériser la végétation rivulaire dans le département de la Loire. Cependant, l'utilisation de ces différents indicateurs est limitée à certaines zones et manque de cohérence d'un bassin versant à l'autre. Cette diversité rend difficile l'évaluation de la situation globale à l'échelle du SAGE et complique l'analyse de leur capacité à répondre aux enjeux du changement climatique.

Le projet de stage en grappe a donc été mis en place pour répondre à cette problématique, et vise notamment à « développer des indicateurs de caractérisation et de suivi de la végétation rivulaire à l'échelle d'un SAGE et dans un contexte de changement climatique ». L'objectif est d'améliorer la compréhension commune de la ripisylve par les différents acteurs de l'eau, afin d'uniformiser les méthodes d'évaluation des zones de SAGE. L'objectif de ce projet est donc de construire une méthode de caractérisation cohérente et fiable, qui puisse s'adapter aux particularités des différents bassins versants, que ce soit en termes de pression agricole, d'imperméabilisation des sols ou de continuité écologique. Cette caractérisation doit être accessible et fonctionnelle pour les structures chargées de sa mise en œuvre.

Cette étude s'inscrit dans ce cadre, en s'intéressant à la relation entre la végétation riparienne comme levier d'atténuation du réchauffement des cours d'eau lié au changement climatique. L'objectif est d'améliorer sa caractérisation dans un modèle de simulation de la température de l'eau, afin de mieux intégrer cet élément dans les stratégies de restauration et d'adaptation, notamment pour limiter l'augmentation de la température de l'eau en période estivale.

Deux autres projets de recherche sont menés en parallèle dans le cadre de ce projet. La première porte sur une approche écologique et socio-territoriale de la végétation riveraine, évaluant dans quelle mesure les indices utilisés pour la végétation reflètent les caractéristiques des espèces végétales locales et s'ils sont pertinents dans le contexte et pour les besoins des gestionnaires. Un autre projet utilise la géomatique pour développer une méthode de caractérisation de la qualité de la végétation riveraine à l'aide de données spatiales.

Un rapport interdisciplinaire sera ensuite produit, rassemblant les données, les résultats et les conclusions des trois études réalisées dans le cadre du projet de cluster. L'objectif est de développer et de mettre en œuvre une approche collaborative de l'analyse des données et de la création d'indicateurs, afin d'améliorer la connaissance et le suivi de la végétation riveraine à l'échelle du SAGE.

1.2 RECHAUFFEMENT DES COURS D'EAU ET MECANISMES D'ATTENUATION

La température de l'eau joue un rôle majeur dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Elle a un impact direct sur la physiologie, la distribution et le cycle de vie de nombreuses espèces (Daufresne et al., 2004 ; Khalanski et al., 2008). Une augmentation significative de la température peut entraîner une baisse de la concentration en oxygène dissous, perturber les

processus de reproduction et de croissance et favoriser la prolifération d'espèces invasives ou de micro-organismes pathogènes (Johnson et al., 2024). Elle est également d'une importance majeure pour la disponibilité des ressources en eau pour l'usage humain. Les fluctuations de température peuvent avoir un impact sur la qualité de l'eau potable, restreindre son utilisation dans l'agriculture ou l'industrie et limiter les activités de loisirs (Webb & Zhang, 1997). Il est donc important de comprendre et de gérer les facteurs qui influencent la température des rivières pour préserver la qualité de l'eau et assurer la durabilité de la ressource.

La température de l'eau des rivières est influencée par de nombreux facteurs, dont l'impact varie en fonction des caractéristiques locales. Ces facteurs peuvent être d'origine naturelle, comme la végétation riveraine et la morphologie du lit, ou résulter d'activités humaines, comme les barrages, les rejets, le pompage de l'eau ou la déforestation (Figure 1) (Caissie, 2006) :

- Les échanges avec l'atmosphère, tels que le rayonnement solaire et les transferts de chaleur avec l'air ambiant ;
- Les échanges avec le lit de la rivière, notamment par les infiltrations ou les apports d'eau souterraine ;
- Les échanges liés au régime hydrologique, tels que le débit, les apports des affluents ou les précipitations.

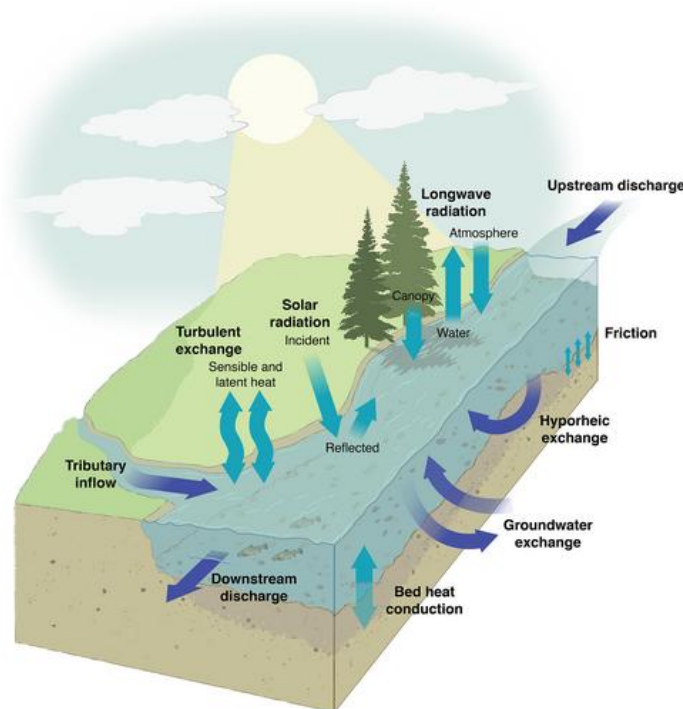


Figure 1 : Diagramme illustrant les différents processus d'échange agissant sur un tronçon de cours d'eau, (issue de (Leach et al., 2023)).

Parmi ces facteurs, les échanges avec l'atmosphère constituent l'un des principaux moteurs notamment avec le rayonnement solaire. Cependant, en période estivale, lorsque l'ensoleillement est à son maximum, certains éléments peuvent en atténuer les effets, comme les apports d'eau souterraine (Hebert et al., 2011 ; Sinokrot et Stefan, 1993) ou la présence de végétation riveraine (Dan Moore et al., 2005). Cette dernière réduit le réchauffement en interceptant et en réfléchissant une partie du rayonnement solaire, limitant ainsi la quantité de chaleur atteignant la surface de l'eau. Son rôle est particulièrement notable sur les températures maximales (Bowler et al., 2012).

L'efficacité de cet ombrage dépend de plusieurs facteurs, dont la largeur du cours d'eau, l'orientation du chenal et la densité de la végétation. L'orientation du chenal influence l'ombrage selon la

disposition de la végétation, affectant ainsi l'intensité du rayonnement solaire reçu. L'étude de Garner et al. (2017) montre que cet effet est particulièrement marqué dans les zones à couverture végétale intermédiaire (30% à 60%), mais devient négligeable lorsque la végétation est très dense ou très faible. L'effet de l'ombrage est généralement plus prononcé dans les tronçons étroits, où il est plus efficace que dans les tronçons plus larges (Ryan et al., 2013).

1.3 RESTAURER LA VEGETATION FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

A l'échelle mondiale, de nombreuses études mettent en évidence une tendance au réchauffement des eaux de surface, en lien direct avec l'élévation des températures de l'air (Kaushal et al., 2010; Langan et al., 2001; Poirel et al., 2008). Les projections climatiques fondées sur les scénarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5 (Calvin et al., 2023), prévoient une poursuite, voire une intensification, du réchauffement global, avec des variations importantes selon les régions (Gutiérrez et al., 2021). À l'échelle du bassin de la Loire, des simulations de température de l'eau indiquent une hausse marquée en période estivale. Selon le scénario RCP 8.5 (Soubeyroux et al., 2020), les anomalies de température estivale pourraient atteindre entre +5,8°C à +7,8°C, par rapport à la période 1963-2019 (Seyedhashemi et al., 2023) (Figure 2).

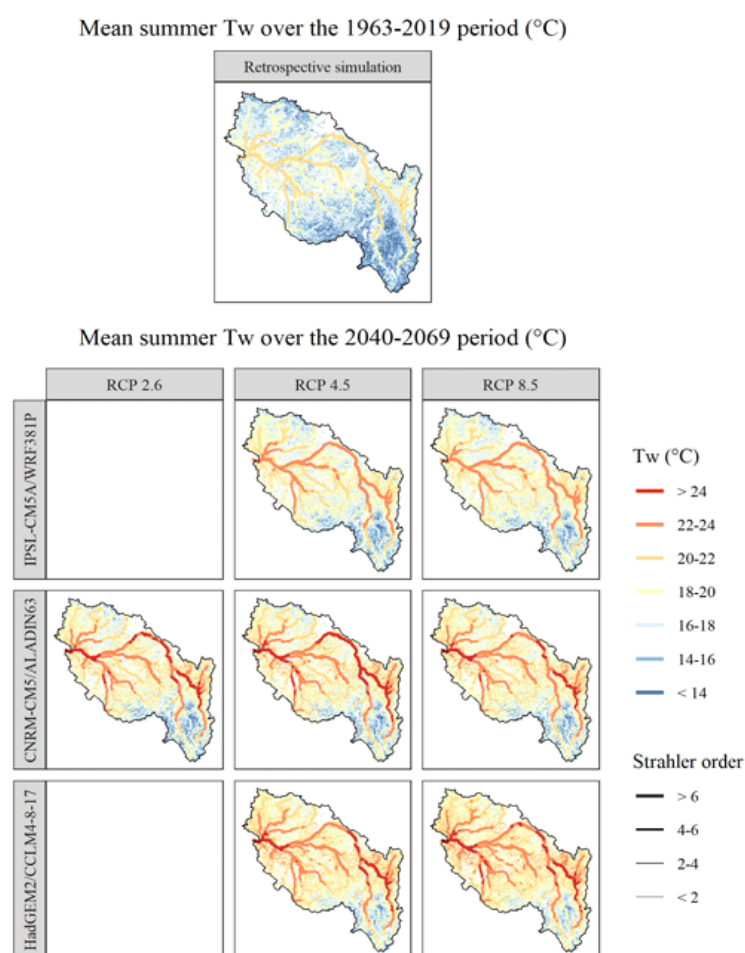


Figure 2 : Variabilité spatiale de la température moyenne estivale de l'eau (Tw) dans la simulation rétrospective couvrant la période 1963–2019, ainsi que dans les projections réalisées avec l'ensemble des modèles climatiques globaux et régionaux (GCMs–RCMs) sous le scénario RCP 8.5 pour le milieu du siècle (2040–2069). Figure issue de l'étude Seyedhashemi et al. (2023).

Face à ces évolutions, plusieurs études proposent des recommandations pour la gestion de la végétation riveraine, souvent spécifiques à certains types de rivières. Par exemple, aux latitudes

moyennes, Dewalle (2010) montre que pour de petites rivières (largeur ≤ 6 m), une zone tampon de 12 m de large peut fournir jusqu'à 80 % d'ombrage, à condition que la végétation ait une hauteur de 30 m et soit suffisamment dense, indépendamment de l'orientation du cours d'eau. Cependant, atteindre cette hauteur est souvent difficile, nécessitant parfois plusieurs siècles de croissance.

Pour les rivières médio-alpines, Kalny et al. (2017) recommandent de restaurer la végétation riveraine afin de maintenir une discontinuité végétale inférieure à 6 000 m et une densité de couverture supérieure à 40 %, afin de limiter l'échauffement lié au rayonnement solaire. Par ailleurs, dans l'hémisphère Nord, Garner et al. (2017) soulignent l'importance de cibler la rive méridionale, la plus exposée au soleil, pour optimiser l'ombrage selon l'orientation du cours d'eau.

1.4 OBJECTIFS DE L'ETUDE

Le réchauffement des rivières est un problème majeur dans le contexte du changement climatique, avec des conséquences pour les écosystèmes et l'utilisation des ressources. Parmi les facteurs d'atténuation, la végétation riveraine joue un rôle essentiel en limitant le réchauffement de l'eau par l'ombrage. L'étude menée dans le bassin de la Loire a montré qu'une augmentation de 25 % de l'ombrage dans les petits cours d'eau peut réduire l'augmentation médiane de la température de l'eau au printemps et en été jusqu'à 0,16 °C/décennie. Toutefois, cet effet reste limité dans les grandes rivières. Dans ce contexte, les outils de modélisation apparaissent comme des leviers essentiels pour anticiper les impacts et orienter les stratégies d'adaptation. Conçu pour simuler les températures de l'eau dans le bassin de la Loire, le modèle T-NET intègre de nombreux paramètres, dont le couvert végétal. Cependant, la fiabilité des simulations peut dépendre de la qualité de la représentation de la végétation. Dans ce travail, deux hypothèses principales sont explorées :

- La première suppose que la précision avec laquelle la végétation est caractérisée peut influencer la qualité des modèles de température simulés par le modèle T-NET. La présente étude vise donc à évaluer si une caractérisation plus précise et plus réaliste de la végétation améliore la capacité du modèle à simuler correctement les températures de l'eau.
- La seconde s'intéresse au rôle de la végétation et plus particulièrement à l'impact de sa densité et de sa continuité spatiale sur l'atténuation de l'intensité lumineuse reçue. L'objectif est d'évaluer l'influence de ces deux paramètres sur l'effet d'ombrage, et donc son influence sur la température de l'eau à l'échelle locale des tronçons.

Pour répondre à ces hypothèses, ce stage propose dans un premier temps d'analyser les simulations du modèle T-NET (Seyedhashemi et al., 2023) sur une zone plus restreinte correspondant aux cours d'eau du département de la Loire. Après une analyse de l'évolution de la température de l'eau dans les bassins sélectionnés, l'étude porte sur une comparaison de simulations entre 2 méthodes de caractérisation de la végétation : le paramétrage initial du modèle T-NET, tel qu'utilisé par Seyedhashemi et al. (2023), et une nouvelle méthode basée sur des données raster haute définition de l'IGN (un Modèle Numérique de Surface (MNS) et un Modèle Numérique de Terrain (MNT)). Les résultats de ces simulations sont comparés aux données observées de température de l'eau fournies par un réseau de stations de différentes sources : la Fédération de Pêche 42 et l'INRAE (RiverLy) afin d'évaluer leur performance. Ensuite, des scénarios de restauration de la végétation riveraine sont testés à l'aide des températures de l'eau simulées pour une journée d'été en 2018. Enfin, un travail de terrain local explore les variations de l'intensité lumineuse et de la température de l'eau en fonction du couvert végétal sur des tronçons de rivière sélectionnés.

2 MATERIEL ET METHODE

2.1 PRESENTATION DES SITES D'ETUDE

Les sites d'étude se trouvent dans la partie amont du bassin versant de la Loire, dans le département de la Loire, au sein du Massif central. Ils se trouvent entre deux massifs montagneux : les Monts du Forez à l'ouest, qui culminent à 1634 m, et les Monts du Lyonnais à l'est, dont le point culminant atteint 984 m d'altitude. Entre ces deux reliefs s'étend la plaine du Forez d'une altitude moyenne inférieure à 400 m d'altitude. Le climat est de type continental, avec des précipitations annuelles comprises entre 600 mm et 1000 mm. Le sol est majoritairement constitué de roches dures (métamorphiques et plutoniques), ce qui limite la présence de nappe d'eau souterraine (Moatar & Dupont, 2016). Par conséquent, les écoulements dans la région dépendent principalement des précipitations.

Deux bassins versant ont été principalement étudiés :

- En rive gauche de la Loire, le bassin du Lignon du Forez, qui draine une superficie de 740 km², il comprend deux affluents majeurs : l'Anzon et le Vizézy.
- En rive droite de la Loire, un ensemble de petits affluents directs de la Loire, représentant une superficie totale de 410 km². Les principaux bassins de ce versant sont celui de la Loise, qui draine 145 km², et celui de la Toranche draine 70 km², comme détaillés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristique des sous bassins versant de l'étude

Cours d'eau principal	Bassin versant (km ²)	Principaux affluents
Toranche	70,1	Ruisseau du Pont Lyonnais; Ruisseau de Thoron; Le Bruchet
Garollet	34,4	Ruisseau de Folx
Soleillant	15,5	Ruisseau du Monteau; Ruisseau de Font Lambert; Ruisseau du Charny
Loise	145	La Doise; Ruisseau de Peregrand; Ruisseau de Goutelas; Ruisseau des Granges; Ruisseau de Vernavelles; Ruisseau de Charny; La Charpassonne; Ruisseau des Charmettes; Ruisseau des Prairies; Ruisseau du Moulin Piquet; Ruisseau de Fontaine; Le Carrat
Gourtarou	33,7	Le Rioux; Le Chanson; Le Salut
Pouilly (ou Vesne)	10,6	Ruisseau de Saint-Marc; Ruisseau du Pont de la Cèdre
Oidiberts	21,6	Ruisseau du Pont de la Cèdre; Ruisseau du Rieu
Collet	6,9	Le Milonnais; Ruisseau de la Ronzière
Villechaise	3,7	Le Regand; Ruisseau des Planches
Bernand	31,5	Ruisseau de Sigibert; Ruisseau de la Flachère
Revoute	17,3	Le Benetton; Ruisseau de Sigibert; Ruisseau de la Flachère
Lignon-du-Forez	740	Le Moingt, le Pralong et le Drugent dont deux majeurs l'Anzon, le Vizézy

Le bassin versant du Lignon du Forez, en rive gauche, est majoritairement couvert par des forêts et milieux semi-naturels (49 %), ainsi que par des territoires agricoles (46 %), selon les données Corine Land Cover (2018). L'occupation du sol dans le bassin en rive droite de la Loire est dominée par les terres agricoles, qui représentent 80 % de la surface, tandis que les forêts et milieu semi-naturels ne couvrent que 12 % du bassin. Sur les deux rives, les territoires artificialisés (zones industrielles ou commerciales, zones urbaines) occupent environ 4% de la surface totale. Par ailleurs, les deux plus

grandes villes du territoire (Montbrison et Feurs) concentrent à elles seules 3% de la population du département.

Ces bassins font l'objet d'un suivi grâce à l'installation de stations de mesure de la température de l'eau (Figure 2). Les données utilisées proviennent de deux sources principales :

- La Fédération de Pêche 42 et les services départementaux de la Loire, avec une couverture temporelle allant de 2009 à 2022. Ce jeu de données, désigné par FX, regroupe les mesures 10 stations.
- L'INRAE (RiverLy), dans le cadre de l'étude menée par Diamond et al. (2022), avec des données collectées entre 2019 et 2020. Ce jeu de données désigné par RX, comprend 19 stations.

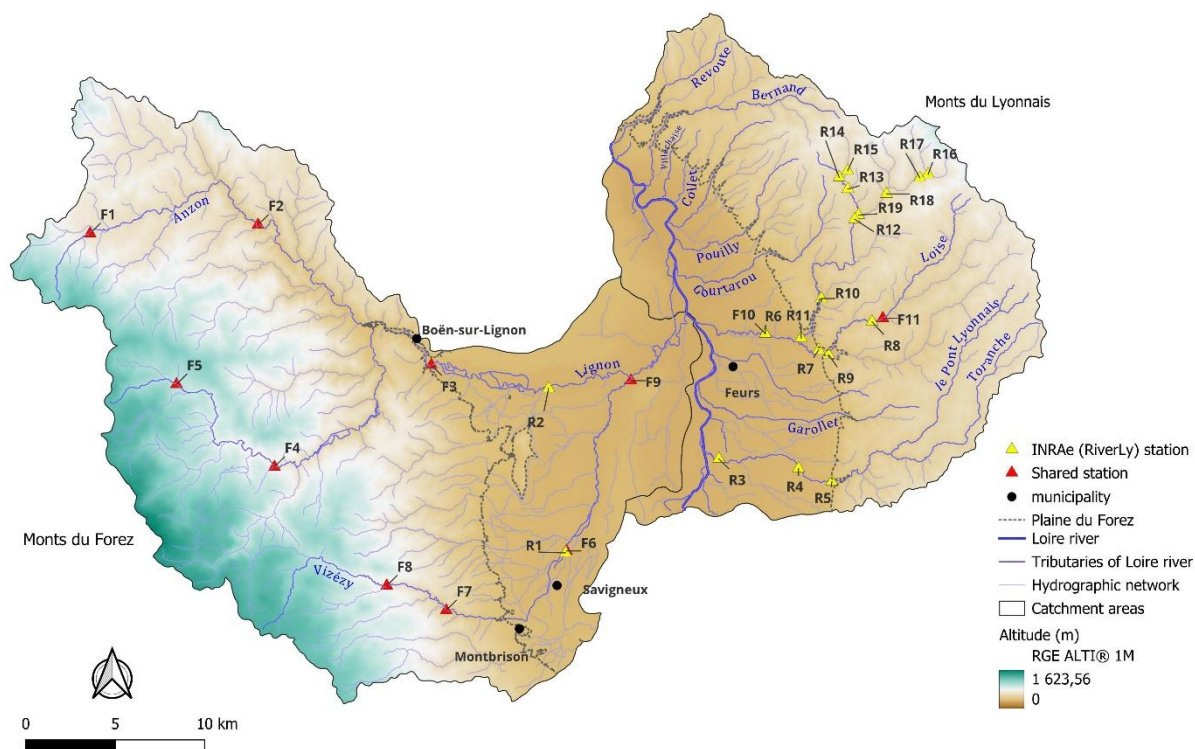


Figure 3 : Localisation des sites d'études dans le bassin versant de la Loire et des stations de mesure de température in situ. Les stations issues de la Fédération de Pêche 42 (en rouge), disposent de données collectées entre 2009 et 2022. Les stations de l'INRAE (en jaune), issue de l'étude Diamond et al. (2022), disposent de données collectées pour les années 2019-2020

Les caractéristiques de ces stations de mesure sont précisées dans le tableau 2. Afin d'assurer la cohérence dans la comparaison des périodes d'observation, seules les données de l'INRAE ont été utilisées pour le bassin la Loire, tandis que celles de la Fédération de Pêche 42 seront utilisées pour le bassin du Lignon.

Tableau 2 : Caractéristiques des stations de mesure de la température de l'eau de la 42ème fédération de pêche et de l'INRAE (RiverLy)

ID Station	Principales cours d'eau	Municipalité	Altitude (m)	Ordre de Strahler (T-NET)	ID des tronçons T-NET	ID Original
R1	Vizézy	Mornand-en-Forez	359,51	4	6412	Viz062
R2	Lignon	Saint-Étienne-le-Molard	348,79	5	6848	Lig426
R3	Toranche	Saint-Laurent-la-Conche	338,64	3	6970	Tor076
R4	Toranche	Saint-Cyr-les-Vignes	360,70	3	6573	Tor063
R5	Toranche	Saint-Cyr-les-Vignes	374,00	3	6573	Tor055
R6	Loise	Salvizinet	337,50	4	7270	Loi132
R7	Loise	Salt-en-Donzy	359,79	3	6895	Loi068
R8	Loise	Essertines-en-Donzy	462,00	3	6748	Loi033
R9	Doise	Jas	373,50	2	6894	Doi028
R10	Charpassonne	Salvizinet	401,39	1	6837	Cha053
R11	Charpassonne	Salt-en-Donzy	348,70	3	7129	Cha057
R12	Charpassonne	Panissières	515,70	3	6511	Cha031
R13	Charpassonne	Montchal	554,59	2	6334	Cha007
R14	Charpassonne	Sainte-Agathe-en-Donzy	576,09	1	6333	Cha034
R15	Carrat	Montchal	587,90	1	6243	Car004
R16	Fontbonne	Panissières	628,59	1	6131	Fon003
R17	Fontbonne	Violay	615,00	2	6144	Fon010
R18	Moulin Piquet	Panissières	554,90	3	6254	Mou019
R19	Moulin Piquet	Montchal	520,79	3	6409	Mou021
F1	Anzon	Noirétable	689,86	2	4346	1412
F2	Anzon	Vêtre-sur-Anzon	465,92	4	5226	1389
F3	Anzon	Boën-sur-Lignon	378,43	5	6233	1413
F4	Courbillon	Sauvain	691,64	4	4957	1417
F5	Lignon	Chalmazel-Jeansagnière	959,75	2	4257	1411
F6	Vizézy	Mornand-en-Forez	360,01	4	6516	1419
F7	Vizézy	Essertines-en-Châtelneuf	463,33	3	5892	1418
F8	Vizézy	Essertines-en-Châtelneuf	691,95	3	5444	1414
F9	Vizézy	Poncins	337,39	4	6841	1415
F11	Loise	Essertines-en-Donzy	465,50	4	7270	1421
F10	Loise	Salvizinet	337,79	3	6748	1420

Une analyse à plus petite échelle a été réalisée sur certains tronçons de la rivière afin d'évaluer l'influence de la couverture végétale sur l'ombrage et la température de l'eau. L'objectif est de mieux comprendre comment la position et la largeur de la végétation sur les berges influencent la quantité de lumière atteignant la surface de l'eau et la température, à l'échelle locale. Les sections ont été sélectionnées sur la base d'images aériennes et de visites sur le terrain, afin de représenter des situations contrastées en termes de densité et de présence ou d'absence de végétation riveraine. Quatre sites ont été sélectionnés (figure 4) :

- Deux dans le bassin versant du Lignon : un sur le Lignon et un sur le Vizézy ;
- Deux dans le bassin versant de la Loise : un sur la Charpassonne et un sur le Garollet.

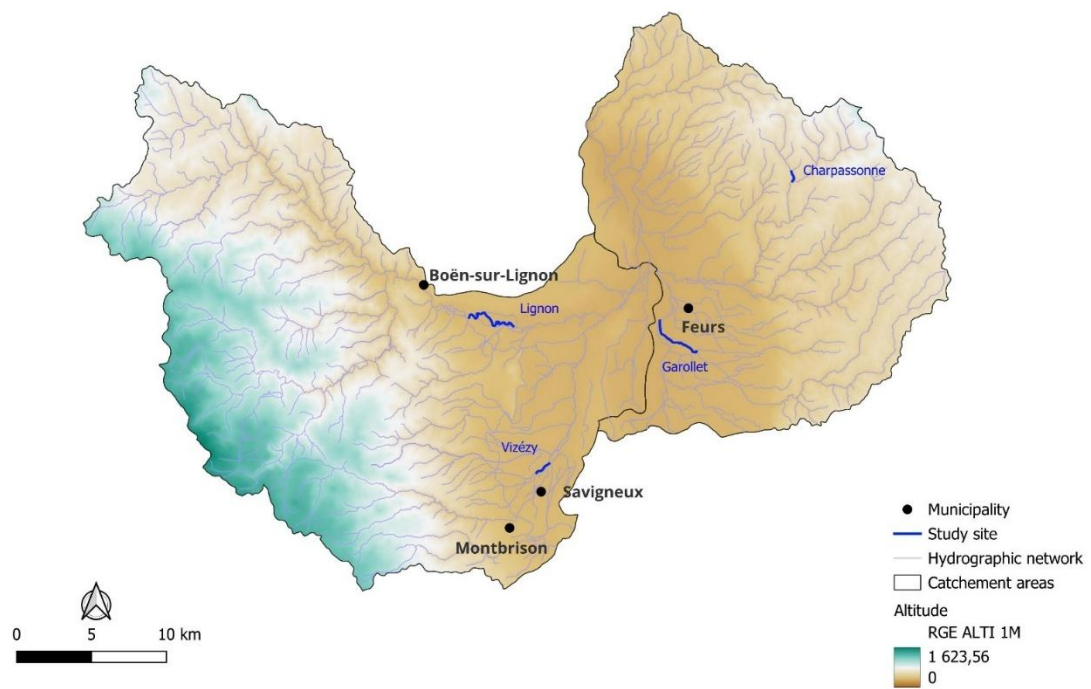


Figure 4 : Localisation des sites sélectionnés pour une étude à l'échelle locale de la température et de l'intensité lumineuse par rapport à des situations contrastées en termes de densité et de présence ou d'absence de végétation riveraine.

2.2 METHODE GENERALE

La méthodologie mise en œuvre dans cette étude visait à analyser l'influence de la végétation rivulaire sur la température de l'eau à l'échelle de petits bassins versant en combinant simulations des températures de l'eau avec le modèle T-NET, traitement de données spatiales et mesure de terrain. Un résumé de la recherche est présenté ci-dessous :

1. Analyse initiale des données simulées

Dans un premier temps, une analyse des données de température simulées par le modèle T-NET (dont le fonctionnement est détaillé au paragraphe 2.2.1) issues de l'étude (Seyedhashemi et al., 2023) a été réalisée afin d'examiner les dynamiques d'échauffement et les variations de température à une échelle plus finie que celle habituellement considérée par les simulations globales du bassin de la Loire

2. Comparaison avec le modèle T-NET actuel

Ensuite, une comparaison a été effectuée entre les données de l'étude (Seyedhashemi et al., 2023) et celle issues d'une simulation du modèle T-NET actuel. Cette comparaison avait pour but d'identifier la simulation de référence qui a servi de base pour la suite des expérimentations avec les paramètres de végétation initiaux du modèle.

3. Validation du modèle T-NET

Le modèle T-NET a ensuite été validé en comparant les températures simulées à celles observées aux stations de mesure. Cette validation a permis de calculer les erreurs de simulation. Une analyse complémentaire a été menée pour identifier l'influence des variables d'entrée sur ces erreurs.

4. Caractérisation de la végétation

Une nouvelle méthode de caractérisation de la végétation a été mise œuvre, reposant sur la différence entre le Modèle numérique de Terrain (MNT) et le Modèle Numérique de Surface (MNS). Cette méthode a permis de calculer deux paramètres intégrés dans le modèle T-NET : la hauteur et la densité de la végétation, à partir de seuils de détection (> 2 m et > 5 m).

5. Nouvelles simulations et évaluation des performances

De nouvelles simulations ont été réalisées en intégrant cette caractérisation. Les performances obtenues ont été évaluées en comparant les températures simulées aux températures observées, puis en les confrontant aux paramètres du modèle utilisant les paramètres initiaux. Une analyse a été menée sur les écarts de performance en lien avec les paramètres d'entrée.

6. Simulation de scénarios de végétation

Plusieurs scénarios de densité de végétation ont été testés :

- un scénario de suppression complète de la végétation sur tous les tronçons
- un scénario d'augmentation uniforme de la densité,
- un scénario ciblant uniquement les rives sud de tronçons sélectionnés en fonction de leur orientation.

Les températures de l'eau simulées ont été comparées entre les différents scénarios pour évaluer leurs effets respectifs.

7. Expérience sur le terrain pour évaluer les effets locaux de la végétation riveraine

Enfin, une expérience sur le terrain a été réalisée sur quatre tronçons au printemps pour étudier en détail l'effet de la végétation riveraine sur l'ombrage et la température de l'eau. Trois types de couverture végétale (dense, partielle, absente) ont été identifiés.

2.3 FONCTIONNEMENT DU MODELE T-NET ET INTEGRATION INITIALE DE LA VEGETATION RIVERAINE A PARTIR DE BD TOPO®.

Le modèle T-NET constitue l'outil centrale de cette étude pour simuler la température de l'eau en fonction de divers paramètres environnementaux. La présente section détaille d'abord le principe de fonctionnement du modèle, puis la manière dont la végétation est intégrée dans sa configuration initiale.

2.3.1 Comment le modèle T-NET fonctionne ?

Le modèle T-NET, est un modèle à base physique qui simule les échanges énergétiques aux interfaces entre l'atmosphère et l'eau et l'eau et le lit, le long du réseau hydrographique de la Loire. Les calculs s'effectuent, par tronçon sur la base de la BD TOPO® AGE, à l'échelle horaire (Beaufort et al., 2016).

Les différentes variables utilisées dans le modèle sont les suivantes :

- Variables météorologiques : elles incluent la température de l'air, l'humidité, la force du vent et les radiations solaires. Ces données proviennent des réanalyses météorologiques SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie) (Vidal *et al.*, 2010), qui fournissent des données journalières sur l'ensemble de la France, avec une résolution spatiale de 8 km.
- Variables hydrologiques : elles concernent notamment les flux de chaleurs et le débit, qui est calculé à l'aide du modèle EROS (Thiéry & Moutzopoulos, 1992).
- Variables géomorphologiques : elles prennent en compte des caractéristiques physiques des cours d'eau telles que la largeur et la profondeur, calculé par des modèles de géométrie hydraulique (Morel et al., 2020) sur la base de débits simulés.

2.3.2 Caractérisation initiale de la végétation à l'aide de la BD TOPO®

Le modèle T-NET intègre un facteur d'ombrage dynamique, qui atténue la radiation solaire dans le bilan énergétique, calculé à un pas de temps horaire selon la méthode proposée par Li et al. (2012). Ce facteur dépend de deux paramètres liés à la végétation : la densité et la hauteur du couvert végétal. Ces informations sont extraites de la BD TOPO®, à partir de zones tampon de 10 mètres de part et d'autre des tronçons, avec un traitement distinct pour les rives droite et gauche :

- La densité de végétation correspond au rapport entre la longueur couverte par un patch de végétation dans la zone tampon et la longueur totale du tronçon.
- La hauteur de la végétation est déterminée en fonction du type identifié dans la BD TOPO®, chaque type étant associé à une hauteur spécifique. En cas de diversité végétale sur une berge, une hauteur moyenne est calculée afin de représenter l'ensemble des formations présentes.

Le modèle prend également en compte un coefficient de transmissivité de la végétation représentant la part de rayonnement solaire traversant le couvert végétal. Ce coefficient varie selon les saisons, sur la base des travaux de Hutchison et Matt (1977) :

- Novembre à février (période sans feuilles) : transmissivité de 0,3
- Mars et avril (croissance des feuilles) : transmissivité de 0,02
- Mai à octobre (période feuillue) : transmissivité de 0, indiquant un blocage total du rayonnement solaire (Seyedhashemi et al., 2022).

2.3.3 Les limites de la méthode et comparaison entre les différentes versions du modèle T-NET

L'utilisation de la BD TOPO® pour caractériser la végétation présente plusieurs limites. Sa mise à jour est peu fréquente (la dernière date de 2015 pour la zone d'étude). De plus, son système de classification est basé sur des seuils restrictifs : par exemple, un alignement d'arbres de moins de 25 m de large est systématiquement classé en haie, ce qui peut sous-estimer la diversité du couvert végétal. De plus, la densité de la végétation est calculée uniquement sur la base de la longueur, sans tenir compte de la largeur des taches de végétation. Ainsi, une bande étroite d'arbres peut être considérée comme équivalente à une végétation plus dense et plus large si elle occupe la même longueur. Enfin, les hauteurs sont attribuées sur la base de valeurs moyennes pour chaque type de formation, ce qui ne reflète pas nécessairement la réalité observée.

L'étude de Seyedhashemi et al. (2023) fournit des simulations rétrospectives de la température de l'eau à l'aide du modèle T-NET sur la période 1963-2019, couvrant l'ensemble du bassin de la Loire, y compris la zone d'étude. Ces résultats ont été comparés à ceux générés par la version actuelle du modèle T-NET. L'objectif était d'évaluer si les données de l'ancienne version pouvaient être utilisées comme référence pour les comparaisons futures, ou s'il existait des différences entre les versions susceptibles d'entraîner des divergences significatives dans les résultats.

2.4 EVALUATION DE LA PERFORMANCE DU MODELE T-NET : COMPARAISON DES SIMULATIONS BASEES SUR LE BD TOPO® AVEC LES TEMPERATURES MESUREES ET ANALYSE DES EFFETS DES PARAMETRES D'ENTREE

Des comparaisons ont été réalisées à l'échelle journalière entre les températures de l'eau simulées issues de l'étude de (Seyedhashemi et al., 2023), celles simulées par la version actuelle du modèle T-NET, et les températures mesurées. L'objectif était d'évaluer les performances du modèle. Pour cela plusieurs métriques ont été utilisées :

- **La moyenne des Biais absolu** : cette métrique quantifie la **moyenne des erreurs** entre les valeurs simulées et les valeurs observées. Elle permet de déterminer si, en moyenne, le modèle **surestime** (valeur de biais positive) ou **sous-estime** (valeur de biais négative) les valeurs observées (Rognant et al., 2013).

$$Biais = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)$$

Soit N le nombre total d'observation, \hat{y}_i la prédiction du modèle et y_i la valeur réelle.

- **La racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM)** : Cette métrique est souvent utilisée pour tester l'**efficacité de la simulation**. La REQM agrège les erreurs entre les valeurs prédites et les valeurs observées en une seule valeur, représentant la performance prédictive du modèle (Rognant et al., 2013).

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N}}$$

Soit N le nombre total d'observation, y_i la valeur observée, \hat{y}_i la prédiction du modèle pour les instants i de la variable.

Des comparaisons ont été effectuées pour chaque station disponible, sur les périodes communes entre les températures simulées et observées.

En outre, une analyse de la performance du modèle (via le RMSE) en fonction de différentes variables d'entrée a été réalisée. Les variables considérées sont : la pente de la section, l'ordre de Strahler (Strahler, 1957), le débit, la largeur estivale moyenne, la distance par rapport à la source et les paramètres de hauteur et de densité de la végétation. Trois outils statistiques ont été utilisés :

- **La corrélation de Spearman (ρ)** : Cette mesure statistique permet d'évaluer la force et le sens d'une relation monotone entre deux variables. C'est un test non paramétrique, qui ne nécessite pas que les données suivent une loi normale, ce qui justifie son utilisation dans cette études les données ne suivant pas toutes une loi normale. Elle varie entre -1 et +1 avec +1 quand les deux variables augmentent de manière parfaitement monotone et -1 quand une variation augmente, et l'autre diminue parfaitement. 0 indique aucune relation. La significativité de la relation sera mesurée avec la p-valeur.
- **La p-valeur (p)** : Cette mesure quantifie la signification statistique d'un résultat dans un test d'hypothèse, en évaluant la probabilité que l'observation soit due au hasard. Une valeur p inférieure à 0,05 indique qu'il existe un risque de 5 % de rejeter à tort l'hypothèse nulle (hypothèse d'absence d'effet). Plus la valeur p est faible, plus le résultat est statistiquement significatif.
- **Le coefficient de détermination (R^2)** : Cette métrique statistique permet d'évaluer la qualité de la prédiction d'un modèle. Elle indique la proportion de la variance des données observées qui est expliquée par le modèle. Plus R^2 est proche de 1, plus le modèle explique bien la variance des données. À l'inverse, plus R^2 est proche de 0, moins le modèle parvient à représenter la variabilité observée.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}$$

Soit n le nombre total d'observation, y_i la valeur observée, \hat{y}_i la prédiction du modèle pour les instants i de la variable.

2.5 DE LA BD TOPO® AUX DONNÉES ALTIMÉTRIQUES MNT/MNS : UNE NOUVELLE APPROCHE POUR UNE CARACTÉRISATION PLUS DÉTAILLÉE DE LA VÉGÉTATION DANS T-NET

Pour fournir au modèle T-NET des paramètres plus précis de la végétation, une méthode d'extraction a été mise en place, basée sur l'utilisation des données de raster de l'IGN : le Modèle Numérique de Terrain (MNT) et le Modèle Numérique de Surface (MNS) (Figure 2).

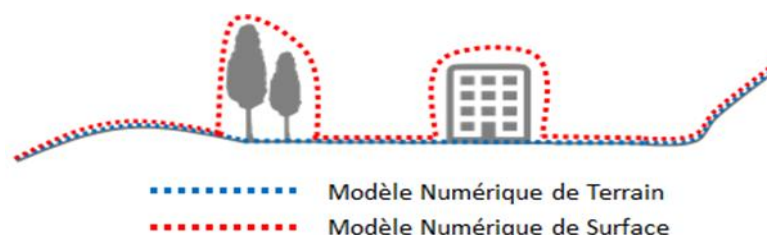


Figure 5 : Représentation des concepts de Modèle numérique de Terrain (MNT) et de Modèle Numérique de Surface (MNS), Source : geoservices.ign.fr

Le MNT, d'une résolution de 1 mètre, représente la hauteur du sol nu, sans tenir compte des éléments de surface tels que la végétation ou les bâtiments. En revanche, le MNS, avec une résolution de 0.5 mètre, intègre ces éléments.

En calculant la différence entre le MNS et le MNT, il est possible d'estimer la hauteur des éléments présents à la surface, notamment la végétation. Cette méthode permet d'extraire les deux paramètres à intégrer dans le modèle T-NET : la densité et la hauteur moyenne de végétation.

2.5.1 Harmonisation des réseaux hydrographique pour l'intégration dans le modèle T-NET

La première étape a consisté à harmoniser les tracés des cours d'eau entre deux sources :

- La BD TOPO®, utilisée pour identifier les axes centraux des rivières, lors de l'extraction des données ;
- Le modèle T-NET, utilisé pour identifier le réseau, structuré en tronçons uniques, chacun étant délimité par deux confluences.

Le découpage spécifique du réseau T-NET attribue un identifiant unique à chaque tronçon, indispensable pour intégrer correctement les paramètres dans le modèle. Cependant, des différences de tracé ont été constatées entre les deux réseaux. La BD TOPO® inclut certains éléments que le réseau T-NET ne prend pas en compte, tels que les chenaux secondaires ou certains canaux et affluents créant de nouvelles confluences, ce qui modifie le découpage en tronçons. Afin d'assurer la cohérence avec la structure du modèle T-NET, ces éléments spécifiques ont été supprimés du réseau de la BD TOPO®. Ce nettoyage a permis d'obtenir un réseau conforme à la logique de segmentation de T-NET, facilitant ainsi la correspondance entre les deux systèmes de données (Figure 6).

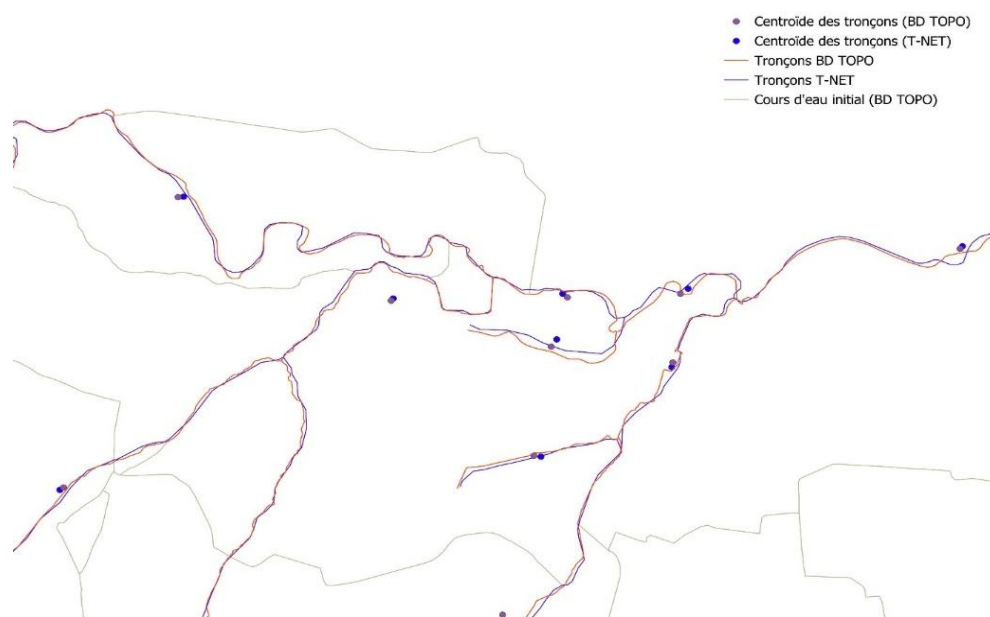


Figure 6 : Comparaison et harmonisation des tracés hydrographiques entre la BD TOPO (en gris avant traitement, en orange après suppression des éléments non pris en compte dans le réseau T-NET) et le réseau T-NET (en bleu). Les centroïde de chaque tronçon sont représentés par des point (orange : BD TOPO, bleu : T-NET) est assure la correspondance des identifiants T-NET.

Une fois le réseau BD TOPO® simplifié, les deux réseaux ont été mis en correspondance par la création d'un centroïde pour chaque tronçon. Ce point central, généré automatiquement à l'aide de la fonction dédiée dans le logiciel QGIS, représente la position moyenne de chaque tronçon.

L'appariement entre les centroïdes des deux réseaux a ensuite été réalisé par la méthode du plus proche voisin. Cette méthode permet d'associer chaque centroïde de la BD TOPO® au centroïde de la T-NET le plus proche, transférant ainsi les identifiants à la BD TOPO®. Ce traitement facilite l'intégration des données dans le modèle T-NET tout en assurant la correspondance.

2.5.2 Génération de la couche de hauteurs de la végétation à partir des couches MNS et MNT

Pour caractériser la végétation riveraine, la différence entre les couches raster MNS (résolution 0,5 m) et MNT (résolution 1 m) a été calculée. Deux seuils de hauteur ont été retenus afin d'isoler la végétation considérée comme significative dans la fonction d'ombrage (Figure 7) :

- (1) La végétation à partir de 2 m de hauteur ;
- (2) La végétation à partir de 5 m de hauteur.

Les éléments en dessous de la valeur seuil retenue ne sont pas considérés comme de la végétation.

Pour les étapes suivantes, les deux couches raster représentant la végétation supérieure à 2 mètres et à 5 mètres ont été traitées séparément, et ce pour chaque rive (droite et gauche) de chaque tronçon.

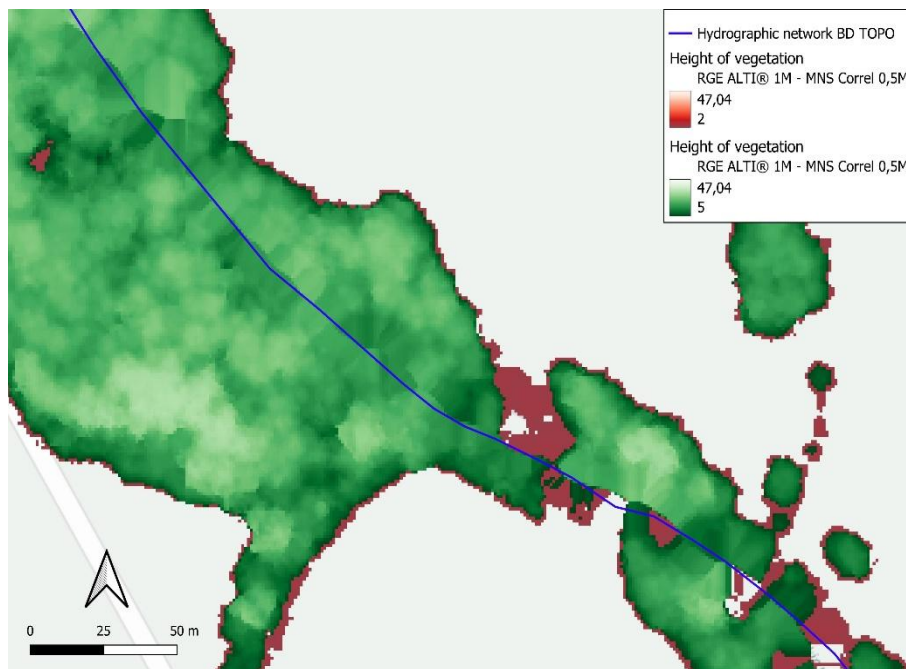


Figure 7 : Hauteur de la végétation estimée par la différence entre le Modèle Numérique de Surface (résolution 0,5 m) et le Modèle Numérique de Terrain (résolution 1m) sur le bassin versant du Lignon, avec deux seuils de détection de la végétation : végétation au-dessus de 2 m (en rouge) et au-dessous de 5 m (en vert).

2.5.3 Délimitation de la zone tampon autour des cours d'eau et extraction de la hauteur et de la densité de végétation

À partir de l'axe central de chaque tronçon du réseau hydrographique de la BD TOPO®, préalablement traité, des unités spatiales de 10 m x 10 m ont été générées. Pour garantir la prise en compte d'un tampon de 10 m sur chaque berge, tout en intégrant la largeur de la zone en eau, cette dernière a été incluse dans le calcul de la largeur totale du tampon. Cette largeur a été estimée comme la moyenne des largeurs simulées par le modèle EROS durant les périodes estivales, sur trois années consécutives disponibles (2010-2013).

Les polygones ainsi créés ont servi de base pour l'extraction et le calcul des informations issues des couches de hauteur de végétation (>2 m et >5 m) (Figure 8).

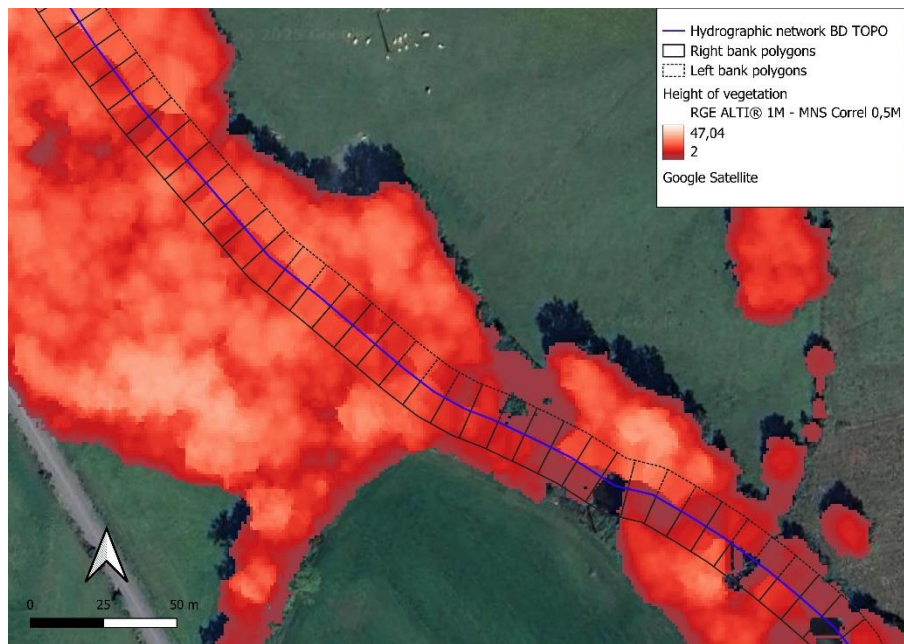


Figure 8 : Hauteur estimée de la végétation, calculée par la différence entre le Modèle Numérique de Surface (résolution 0,5 m) et le Modèle Numérique de Terrain (résolution 1 m), avec un seuil de détection de la végétation au-dessus de 2 m. Les polygones correspondent aux zones tampons de 10m pour chaque rive (rive droite : en pointillé ; rive gauche : trait plein) du cours d'eau utilisés pour extraire les paramètres de densité et hauteur moyenne de végétation nécessaire au modèle T-NET.

Pour chaque tronçon, une série de paramètres a été calculée à partir des polygones générés, afin d'estimer la densité et la hauteur de la végétation :

- a. La surface totale des polygones
- b. La surface végétalisée des polygones : la portion de surface couverte par de la végétation.
- c. Le pourcentage de couverture végétale des polygones : $(= \text{Surface végétalisée (b.)} / \text{surface totale du polygone (a.)} \times 100)$.
- d. La surface totale du tronçon : somme des surfaces des polygones associés au tronçon (calculée en a.).

Remarque : Pour la suite du traitement, seuls les polygones dont la couverture végétale dépasse 10 %, (c. > 10 %), ont été conservés. Ce seuil permet de limiter les erreurs liées à la détection de végétation extérieure au polygone, comme des branches débordant de sur la zone tampon et autres artefacts liés à la différence de résolution entre les différentes couches utilisées.

- e. Le poids du polygone : $(= \text{Surface du polygone} / \text{surface du tronçon})$, le poids représente la part relative de chaque polygone par rapport à l'ensemble du tronçon.
- f. La densité de végétation : $(= (\text{pourcentage de végétation} / 100) \times (\text{poids du tronçons} / 100) \times 100)$. Cette densité pondérée est la valeur finale qui sera intégrée dans le modèle T-NET pour chaque tronçon.

Pour estimer une hauteur moyenne de végétation représentative à l'échelle des chaque tronçons, les étapes suivantes ont été mises en œuvre :

- g. La hauteur moyenne de la végétation des polygones : Calculée à partir de la moyenne des valeurs extraites de la couche raster de hauteur de végétation (Figure 9).
- h. La surface végétalisée totale des tronçons : $(= \text{somme des surfaces végétalisées par polygone (calculé en b.)})$.

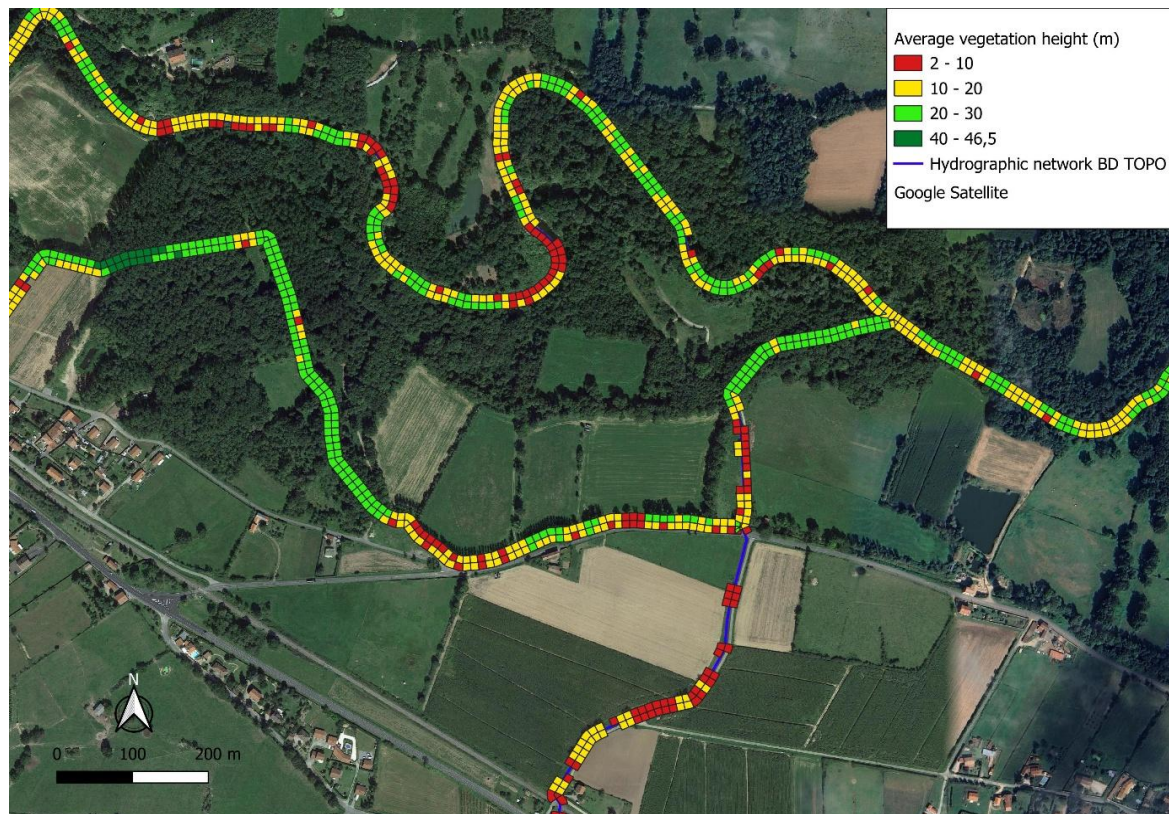


Figure 9 : Hauteur moyenne de la végétation (en mètres), estimée par unités spatiales de 10 m de largeur le long des berges du cours d'eau du Lignon. Les hauteurs ont été obtenues par différence entre le Modèle Numérique de Surface (MNS, résolution 0,5 m) et le Modèle Numérique de Terrain (MNT, résolution 1 m).

- i. Le ratio de la végétation par polygone : $(= \text{surface végétalisée du polygone (b.)} / \text{surface végétalisée totale du tronçon (l.)})$. Ce ratio permet de connaître le poids de chaque polygone dans la végétation totale du tronçon.
- j. **La hauteur moyenne par tronçon** : $(= \text{Hauteur moyenne par polygone (k.)} \times \text{Ratio de végétation (m.)})$. Cette pondération permet de tenir compte de la contribution réelle de chaque polygone à la hauteur moyenne globale du tronçon.
Le résultat final correspond à la hauteur de la végétation par tronçon qui est utilisée comme le deuxième paramètre d'entrée dans le modèle T-NET.

2.6 COMPARAISON ET ANALYSES DES DIFFERENCES DE PERFORMANCES DU MODELE T-NET AVANT ET APRES L'INTEGRATION DES NOUVEAUX PARAMETRES DE VEGETATION

A partir de la nouvelle caractérisation de la végétation, de nouvelles simulations ont été effectuées en utilisant les mêmes paramètres en entrée, sur une période identique allant de 2008 à 2020 que la simulation initiale. Seules deux caractéristiques d'entrée ont été modifiées entre les différentes simulations : la hauteur moyenne et de densité de végétation.

Chaque simulation a ensuite été comparée aux températures de l'eau mesurées dans les stations de mesure disponible afin d'évaluer leur performance utilisant les mêmes métriques détaillées dans la section 2.2.2. Les résultats des simulations ont été comparés entre elles à l'aide de la différence entre ces indicateurs (biais et RMSE).

La variation de la RMSE entre la simulation initiale et celles intégrant les nouveaux paramètres de végétation ont également été analysées, en examinant les relations entre cette différence de

performance et les changements de hauteur et de densité de végétation par la corrélation de Spearman et la p-value. Pour ce faire, les métriques sont les mêmes que celles détaillées en section 2.2.3.

2.7 EVALUATION DES SCENARIOS DE GESTION DE LA VEGETATION

Dans cette section, différents scénarios de gestion ou de modification de la végétation riveraine sont testés afin d'évaluer leur influence sur la température de l'eau simulée par le modèle T-NET.

2.7.1 Sensibilité du modèle à la variation de la végétation

Afin d'évaluer la sensibilité du modèle aux variations importantes de la végétation, deux scénarios extrêmes ont été appliqués.

- (1) Suppression complète de la végétation sur tous les tronçons, en ramenant le paramètre de densité de végétation à 0%.
- (2) Mise en place de végétation sur tous les tronçons, en appliquant un paramètre de densité de végétation de 100%.

L'objectif était de vérifier dans quelle mesure une modification significative de la densité végétale influence les résultats produits par le modèle. Les résultats issus de ces scénarios ont été comparés aux températures mesurées dans les stations disponibles avec les mêmes métriques détaillées en section 2.2.2 s'appuyant sur les indicateurs de la RMSE et du biais.

2.7.2 Scénario de restauration ciblée de la végétation sur les rives sud

Un scénario de restauration ciblant les rives sud, proposé Garner et al, (2017) est appliquée. Il consiste à augmenter la densité de végétation uniquement sur les rives les plus exposées au rayonnement solaire, les rives sud. Ce scénario cible les tronçons répondant aux deux critères suivants :

- Un paramètre initial de la densité de végétation inférieure à 60 % ;
- Une orientation spécifique selon la rive.

Pour les rives gauches, les tronçons concernés ont une orientation allant de l'Est vers Ouest, du Nord-Est vers Sud-Ouest ou du Sud-Est vers Nord-Ouest. Dans le modèle, ces tronçons correspondent à une orientation comprise entre 202.5 ° et 337.5° par rapport au nord.

Pour les rives droites, les tronçons concernés ont une orientation allant de Ouest vers Est, du Nord-Ouest vers Sud-Est, ou du Sud-Ouest vers Nord-Est. Dans le modèle, cela correspond à une orientation comprise entre 22.5° et 157.5° par rapport au nord.

2.8 EXPERIMENTATION A PLUS PETITE ECHELLE : EFFETS LOCAUX DE LA VEGETATION RIVERAINE SUR L'OMBRAGE ET LA TEMPERATURE DE L'EAU

Afin de compléter les analyses produites par le modèle T-NET et d'évaluer plus en détail les effets de la végétation riveraine sur l'ombrage et la température de l'eau, une expérience de terrain à l'échelle de 4 tronçons a été réalisée au printemps. L'objectif était d'observer, dans des conditions réelles, l'influence de différentes couvertures végétales. L'objectif était de mieux comprendre les mécanismes d'ombrage à petite échelle, de mettre en évidence l'hétérogénéité des températures de l'eau au sein d'un même tronçon et de fournir des données sur la température.

Sur chacun des quatre tronçons sélectionnés, trois emplacements ont été identifiés grâce à une évaluation visuelle combinant l'imagerie aérienne et les observations sur le terrain. Cette sélection nous a permis de représenter trois types de configuration de la végétation riveraine (Figure 10) :

- Végétation dense
- Végétation partielle
- Pas de végétation (référence)

Sur chaque site, la température de l'eau a été mesurée toutes les heures à l'aide d'un thermomètre/conductimètre (HOBO U24-001). L'intensité lumineuse atteignant la surface de l'eau et la température de l'air ont été mesurées toutes les heures à l'aide d'un thermomètre/luxmètre (HOBO UA-002-64).



Figure 10 : Site du Garollet, affluent en rive droite de la Loire, avec la localisation des trois points de mesure. Chaque point est équipé d'une sonde conductimètre (température de l'eau), d'un luxmètre (luminosité) et d'un capteur de température de l'air. Les emplacements sont répartis selon la structure de la végétation : VD (végétation dense), VP (végétation partielle) et SV (sans

Les enregistrements ont débuté le 14 mars, avant le développement de la végétation, et se sont terminés le 25 avril 2025. Cependant, en raison d'un problème de réglage de certains luxmètres, les données de luminosité sont incomplètes sur certains sites, les enregistrements n'ayant débuté que le 3 avril 2025. De plus, un dysfonctionnement dans le réglage de la borne de refoulement a interrompu les mesures de tous les capteurs (luxmètres et sondes de température) entre le 28 mars 2025 et le 3 avril 2025.

3 RESULTATS

3.1 ANALYSE DE L'EVOLUTION DES TEMPERATURES SIMULEES PAR LE MODELE T-NET AVEC LES PARAMETRES INITIAUX (BD TOPO®)

Cette section présente une analyse des températures simulées par le modèle T-NET en utilisant la paramétrisation initiale basée sur la BD TOPO®. Elle s'appuie sur les résultats de l'étude de Seyedhashemi et al. (2023) et sur des simulations complémentaires réalisées avec la version actuelle du modèle. L'objectif est d'évaluer l'évolution des températures simulées dans le temps, de comparer les performances des différentes versions du modèle, et d'identifier les facteurs influençant la précision des simulations.

3.1.1 Simulation de l'évolution historique des températures dans les bassins étudiés : analyse des résultats de l'étude de Seyedhashemi et al. (2023)

L'analyse de l'évolution des températures de l'eau simulées entre 1963 et 2019 par le modèle T-NET, sur la base des données de (Seyedhashemi et al., 2023), met en évidence une tendance générale au réchauffement depuis les années 1970. La température moyenne est passée de 8,54°C dans les années 1970 à 10,2°C en 2010. Il existe des différences entre la ARDL et la ARGL, comme le montre la figure 11. Pour la ARDL, la température moyenne maximale a été atteinte dans les années 2000, avec une moyenne de 11,2°C. Pour la ARGL, en revanche, le pic est atteint dans les années 2010, avec une moyenne de 9,65°C.

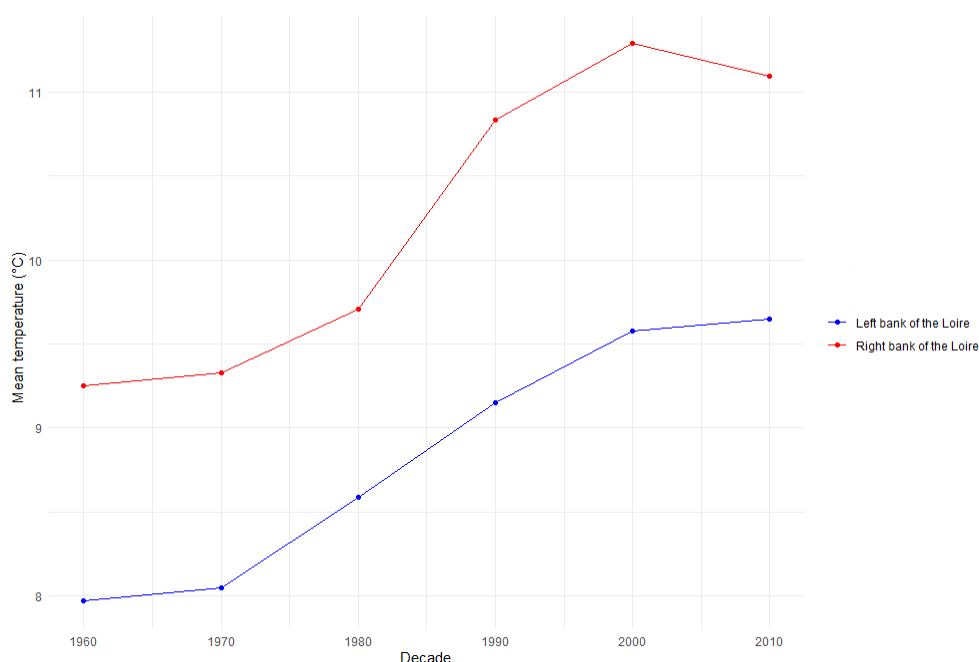


Figure 11 : Evolution de la température moyenne décennale de l'eau entre 1963-2019, simulée par le modèle T-NET dans l'étude de Seyedhashemi et al. (2023), pour les affluents de la rive droite (en rouge) et de la rive gauche (en bleu) de la Loire.

Une estimation du réchauffement des températures de l'eau simulées par décennie a été déterminée en analysant les tendances des températures dans le temps. Cette analyse a permis d'identifier une tendance à l'aide d'une régression linéaire dont la pente représente le taux de changement annuel de la température (Figure 12).

L'analyse du réchauffement moyen simulé par décennie (en multipliant la pente obtenue à la figure 11 par 10) et selon l'ordre de Strahler (figure 13), révèle un réchauffement de l'eau plus marqué en été qu'à l'échelle annuelle. La médiane estivale est de 0,59°C/décennie, contre une médiane annuelle de 0,44°C/décennie.

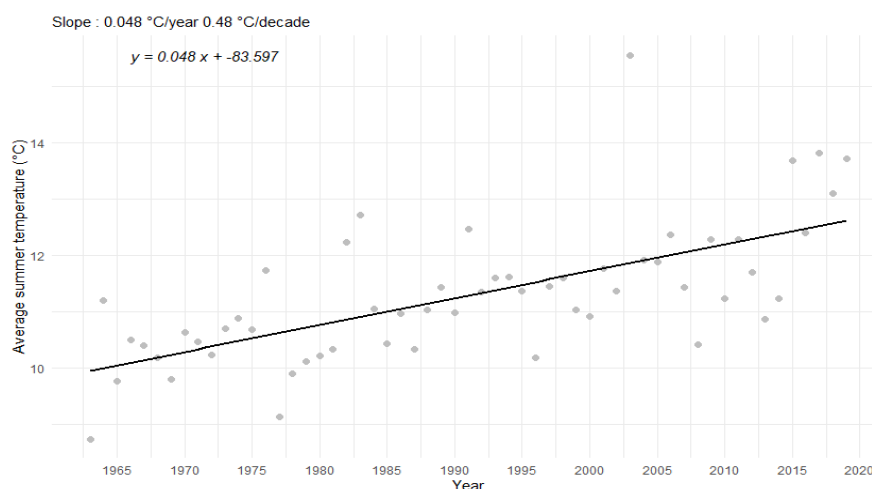


Figure 12 : Exemple de l'évolution annuelle de la température moyenne estivale (juin, juillet, août) par année pour un tronçon T-NET (Identifiant : 4209), utilisée pour estimer l'échauffement par décennie. La pente de la droite de régression linéaire représente le taux d'échauffement annuel de la température.

Il existe également des différences notables entre les ARGL et les ARDL. Les ARDL présentent un réchauffement estival plus important, avec une médiane de 0,63°C/décennie (allant de 0,60°C à 0,64°C), contre 0,56°C/décennie pour les ARGL, avec une variation allant de 0,53 à 0,64°C.

Pour les ARDL, le réchauffement estival est plus important dans les sections d'ordre Strahler inférieur (ordres 1 et 2), avec des températures médianes de 0,64°C/décennie pour l'ordre 1 et de 0,62°C/décennie pour l'ordre 2. Inversement, pour les ARGL, le réchauffement maximal est observé dans les sections d'ordre de Strahler supérieur (ordres 4 et 5), avec des médianes de 0,59°C et 0,64°C/décennie respectivement.

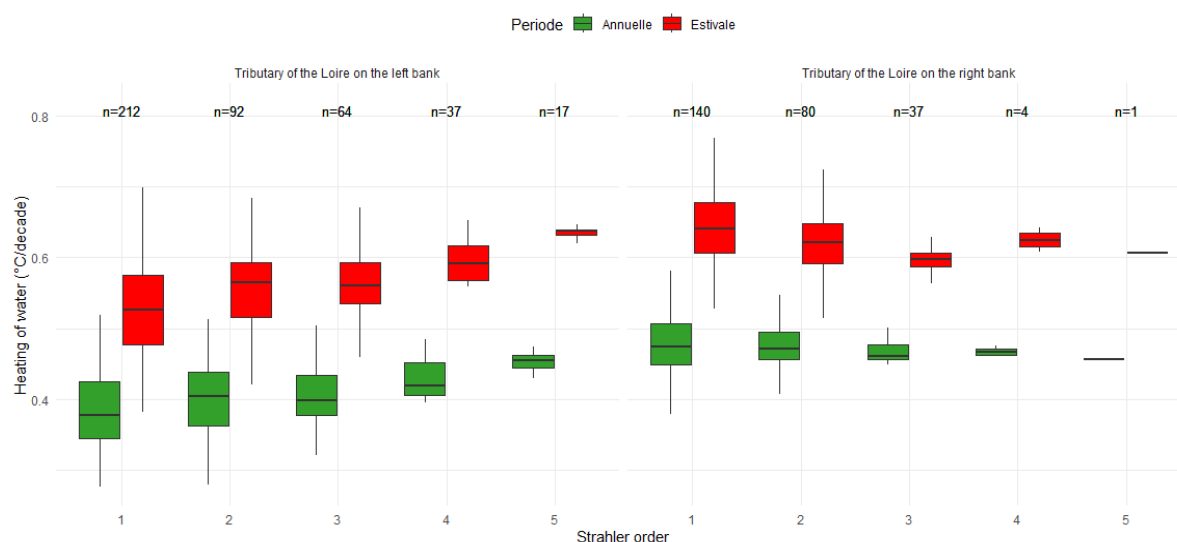


Figure 13 : Distribution des échauffements décennaux pour la période annuelle (en vert) et estivale (juin, juillet, août) (en rouge) de l'eau simulée par le modèle T-NET dans l'étude de Seyedhashemi et al. (2023), selon l'ordre de Strahler, pour les affluents de la rive droite et de la rive gauche de la Loire. n = le nombre de tronçon par ordre de Strahler.

3.1.2 Comparaison des simulations : ancienne et nouvelle version du modèle T-NET

La comparaison entre les températures simulées par Seyedhashemi et al. (2023), sur la période 1963-2019, et celles issues de la version actuelle du modèle T-NET (2025), simulées sur la période 2008-2019, met en évidence des divergences, notamment durant la période estivale (Figure 14, A). Pour la période de simulation commune (2008-2019), l'écart médian estival atteint $-0,149^{\circ}\text{C}$, contre $-0,072^{\circ}\text{C}$ pour la médiane annuelle. L'analyse détaillée des écarts estivaux (Figure 14, B) montre une médiane inférieure à $-0,25^{\circ}\text{C}$ pour toutes les années, avec une variabilité interannuelle.

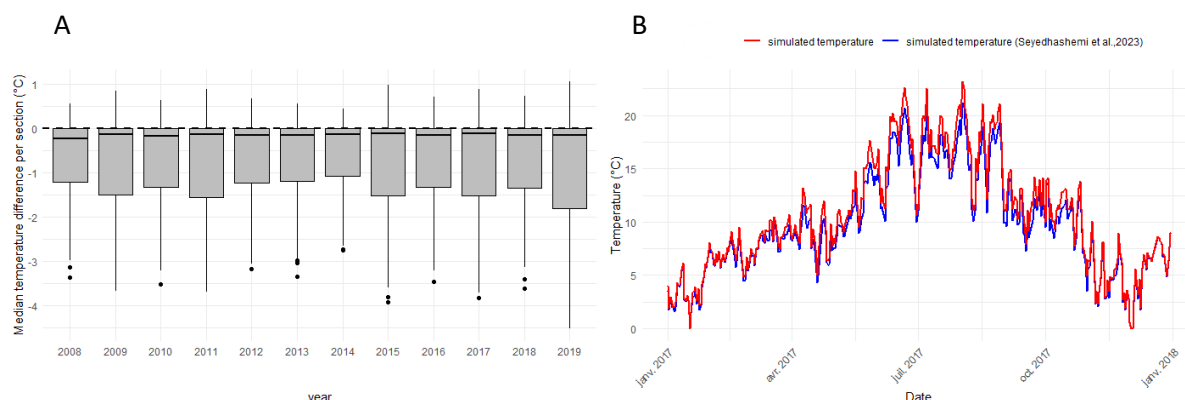


Figure 14 : A = Ecarts médians entre les températures simulées provenant de l'étude Seyedhashemi et al. (2023) et celles simulées par la version actuelle du modèle T-NET, pour la période estivale (juin, juillet, août) entre 2008 et 2019. B = Evolution des températures simulées par l'étude Seyedhashemi et al. (2023) (en bleu) et par la version actuelle du modèle T-NET (en rouge) au cours de l'année 2017 pour un tronçon de réseau T-NET.

Le premier quartile, représentant 25% des valeurs d'écart, est systématiquement inférieur à -1°C , avec des valeurs allant de $-1,08^{\circ}\text{C}$ à $-1,81^{\circ}\text{C}$. La nouvelle version du modèle T-NET tend donc à simuler des températures de l'eau plus basses que l'ancienne version utilisée dans l'étude de Seyedhashemi et al. (2023), en particulier durant la période estivale.

Ces différences s'expliquent notamment par la correction, en avril 2024, d'une erreur dans le calcul des débits aux confluences dans le modèle T-NET. Avant cette correction, les débits n'étaient pas correctement conservés, la somme des débits amont ne correspondant pas au débit total aval.

Au vu de cette correction, il semble approprié de considérer la version actuelle du modèle T-NET comme référence pour les températures simulées, et non les données fournies par l'étude de Seyedhashemi et al. (2023). Ceci permet de limiter les biais entre les différents scénarios de simulation et de garantir des conditions initiales cohérentes pour toutes les analyses.

3.1.3 Évaluation des performances du modèle T-NET (ancienne et nouvelle versions) avec paramétrage initial de la végétation basé sur BD TOPO® : Simulation vs. Données mesurées

La comparaison entre les températures simulées par le modèle initial (BD TOPO®) et les températures observées aux différentes stations révèle des variations variables d'un site à l'autre. Visuellement, les températures simulées présentent une plus grande variabilité que les températures mesurées, suggérant une tendance du modèle à amplifier les fluctuations thermiques (Figure 15)

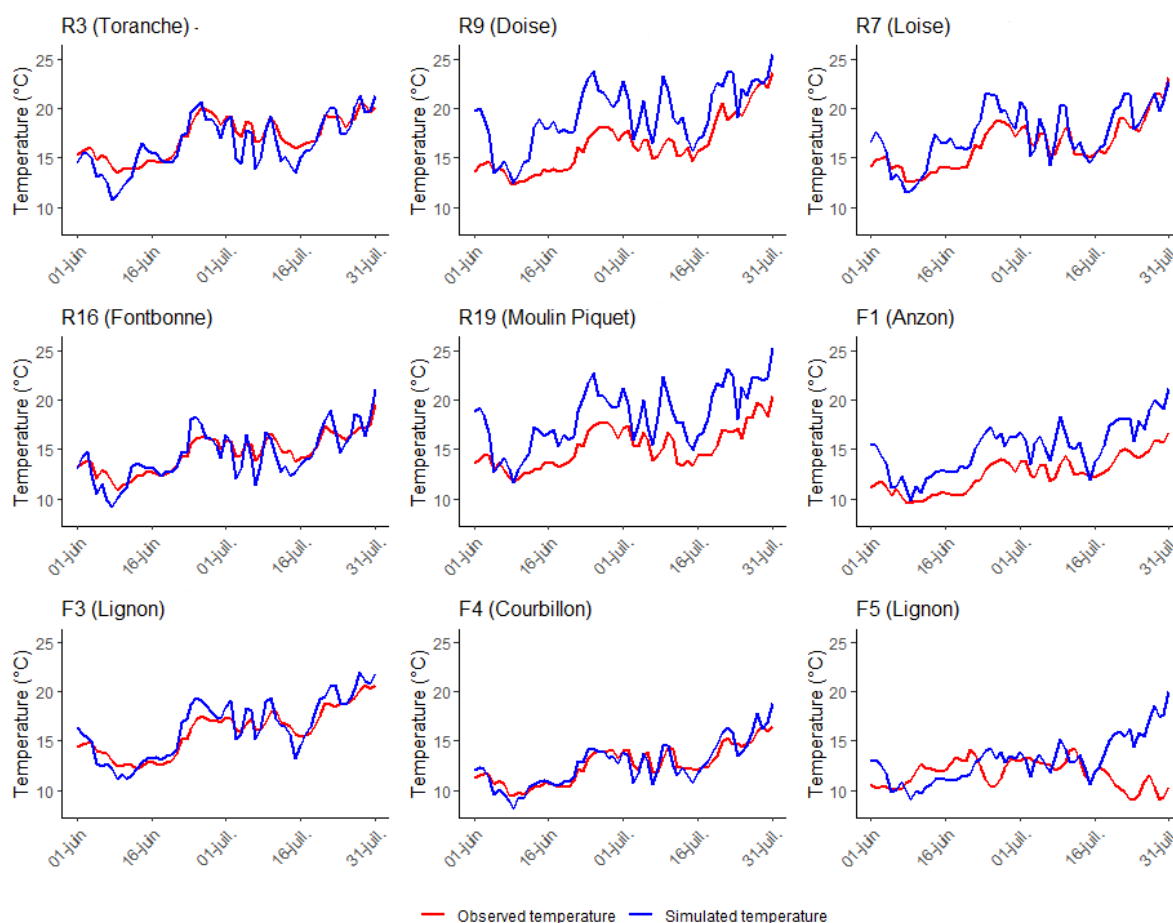


Figure 15 : Comparaison des températures de l'eau simulées par le modèle T-NET (en bleu) et mesurées (en rouge) pour différentes stations du bassin versant de la Loire au cours de l'été 2020 (juin, juillet).

L'analyse des performances du modèle initial (Figure 16) a mis en évidence que l'erreur médiane (RMSE) sur les températures simulées par rapport aux températures observées dans le bassin du Lignon était de 2,07°C (fourchette de 1,59°C à 3,79°C selon les stations).

Dans le bassin de la Loise, l'erreur médiane était de 2,22°C (de 1,24°C à 4,29°C). Les deux bassins versants ont présenté un biais médian positif, reflétant la nette tendance du modèle à surestimer les températures simulées. Dans le bassin du Lignon, le biais médian était de +0,65°C (de -1,14°C à +3,44°C), tandis que pour le bassin de la Loise, le biais médian était de +0,59°C (de -1,94°C à +3,62°C). Ainsi, si le modèle a tendance à surestimer, il ne présente pas de biais systématique variant d'une station à l'autre. La comparaison entre les températures simulées par le modèle initial (BD TOPO®) et les températures observées aux différentes stations révèle des variations variables d'un site à l'autre. Visuellement, les températures simulées présentent une plus grande variabilité que les températures mesurées, ce qui suggère une tendance du modèle à amplifier les fluctuations thermiques (Figure 15)

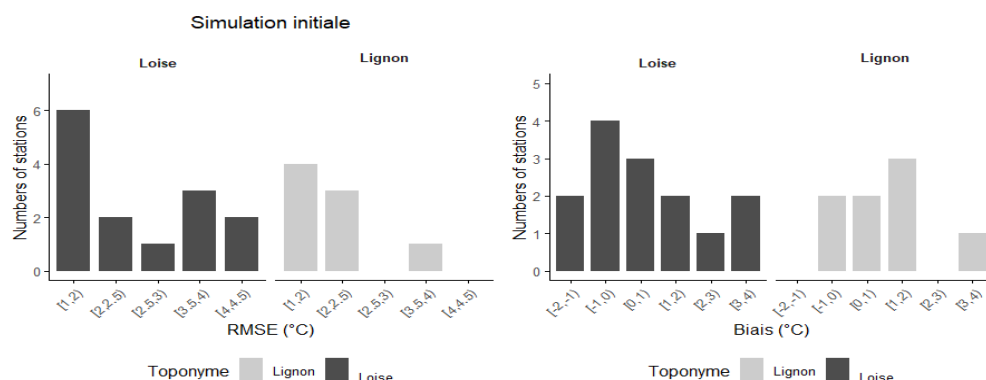


Figure 16 : Distribution des erreurs de simulation (RMSE) et du biais pour le modèle initial T-NET, basé sur la BD Topage, dans les sous-bassins versant de la Loise (stations RiverLy) et du Lignon (Stations Fédération de Pêche 42) en période estivale (juin, juillet, août).

De plus, une analyse de la distribution annuelle des erreurs (RMSE) pour 4 des stations situées dans le bassin du Lignon avec des séries temporelles partagées indique qu'il n'y a pas de tendance marquée à l'augmentation ou à la diminution des erreurs entre les années chaudes (2015, 2017, 2019) et les années froides (2014).

Enfin, la comparaison des températures simulées produites entre les deux versions de T-NET utilisant des stations avec des données partagées d'abord pour les emplacements FX (2009-2019) et ensuite pour les emplacements RX (2019) indique une plus grande perte de performance par rapport aux bassins du Lignon et de la Loise. Une évaluation de l'erreur par station est fournie en annexe 1. Dans le bassin du Lignon, l'erreur médiane (RMSE) était de 1,71°C, d'après Seyedhashemi et al. (2023), pour la version actuelle du modèle, elle était de 2,07°C. De plus, pour le bassin de la Loise, la version actuelle montre une moins bonne performance avec une erreur médiane passant de 1,76°C à 2,30°C.

3.1.4 Analyse de l'influence des paramètres en entrée du modèle sur les performances

L'analyse des performances du modèle initial vise à comprendre comment les paramètres d'entrée du modèle influencent ces performances. Elle montre que l'erreur (RMSE) sur le bassin du Lignon (Tableau 3) révèle que l'erreur (RMSE) est influencée par plusieurs variables.

Tableau 3 : Résumer des relations significatives entre l'erreur (RMSE) de la simulation des températures du modèle initial T-NET et les températures mesurées aux stations disponibles dans le bassin de la Loise (issue de INRAe RiverLy sur la période 2019-2020) et dans le bassin du Lignon (issue de la Fédération de Pêche 42, sur la période 2009-2022) entre les paramètres en entrée du modèle T-NET. Les paramètres de hauteur de végétation et de densité ont été intégrés en fonction des rives droite et gauche des tronçons. Seules les corrélations significatives ont été conservées dans ce tableau.

Paramètres	Bassin Versant	p-value	Corrélation Spearman	R ²	Nombre d'observations
Distance à la source (km)	Lignon	8,13 10 ⁻⁷	-0,532	0,11	73
Ordre de Strahler	Lignon	0,003	-0,245	0,1	73
Pente (°)	Lignon	0,001	-0,95	0,14	73
Hauteur de la végétation en rive droite (m)	Lignon	0,0004	-0,401	0,39	73
Densité de végétation en rive droite (%)	Loise	0,001	-0,644	0,59	21
Densité de végétation en rive gauche (%)	Loise	0,001	-0,656	0,6	21
	Lignon	0,01	-0,293	0,03	73
Largeur moyenne estivales (m)	Lignon	0,001	-0,374	0,13	73
Débit (m ³ /s)	Lignon	0,0005	-0,457	0,08	73

La distance à la source a affiché une corrélation négative modérée ($p = -0,53$, $p < 0,001$), ce qui indique qu'à mesure que la distance à la source augmente, l'erreur quadratique moyenne tend à être plus faible (bien que cette relation ne soit pas complètement linéaire ($R^2 = 0,11$)). De même, la largeur des berges en été était également négativement corrélée ($p = -0,374$, $p = 0,001$) et expliquait 13 % de la variance, ce qui indique que les sites plus larges présentaient également une erreur globale plus faible. Le débit était également négativement corrélé ($p = -0,457$, $p < 0,01$) et expliquait 8 % de la variance ($R^2 = 0,08$), ce qui suggère une meilleure performance du modèle à des débits plus élevés.

La hauteur de la végétation sur la rive droite était le prédicteur le plus important avec la variance expliquée la plus élevée, 39% ($R^2 = 0.39$), et une corrélation négative ($p = -0.401$, $p = 0.0004$) indiquant que les zones avec plus de hauteur de végétation sur la rive droite avaient tendance à être des sites avec une erreur plus faible. Enfin, la densité de la végétation sur la rive gauche était également négativement corrélée avec l'erreur, mais dans une moindre mesure ($p = -0,293$, $p = 0,001$).

Dans le bassin de la Loise, aucune relation significative n'a été observée pour les paramètres d'entrée, à l'exception de la densité de la végétation. De fortes corrélations négatives ont été trouvées avec la densité de la végétation sur les deux rives ($p = -0,656$, $p < 0,001$ pour la rive gauche ; $p = -0,644$, $p < 0,001$ pour la rive droite), ce qui indique que les sites à forte densité de végétation ont tendance à être des sites avec une erreur plus faible sur les deux rives.

3.2 IMPACT DE LA NOUVELLE CARACTERISATION DE LA VEGETATION SUR LES PARAMETRES DE HAUTEUR ET DE DENSITE : PARAMETRAGE INITIAL BASE SUR BD TOPO® ET APPROCHE BASEE SUR LA DIFFERENCE MNS-MNT

Afin d'évaluer l'apport de la nouvelle méthode de caractérisation de la végétation à la performance du modèle T-NET, une comparaison a été effectuée entre les paramètres de végétation obtenus à partir de l'approche initiale, basée sur la base de données BD TOPO®, et ceux obtenus à partir de la méthode MNS-MNT. Cette comparaison a porté sur deux variables clés : la densité et la hauteur de la végétation et a été réalisée en considérant deux seuils de détection (2 m et 5 m) afin d'analyser leur influence sur les résultats.

3.2.1 Comparaison des paramètres de la densité de végétation

La fréquence des taux de densité de végétation a été analysée séparément pour chaque rive (droite et gauche) des tronçons, afin d'examiner les différences de densité de végétation entre les affluents situés en rive droite et ceux situés en rive gauche de la Loire (Figure 17).

Selon les seuils utilisés, les écarts entre les paramètres de densité de végétation initiaux et ceux déterminés par la nouvelle méthode, appliquée avec deux seuils de détection, présentent des résultats contrastés. Avec un seuil de 5 mètres, la méthode tend à diminuer la densité de végétation de -1,87% en moyenne pour la ARGL et de -3,57% pour la ARDL. Cependant, par rapport aux valeurs initiales, la densité de la végétation s'améliore en moyenne de +4,5% pour la ARGL et de +5,5% pour la ARDL lorsque le critère de 2 mètres est appliqué.

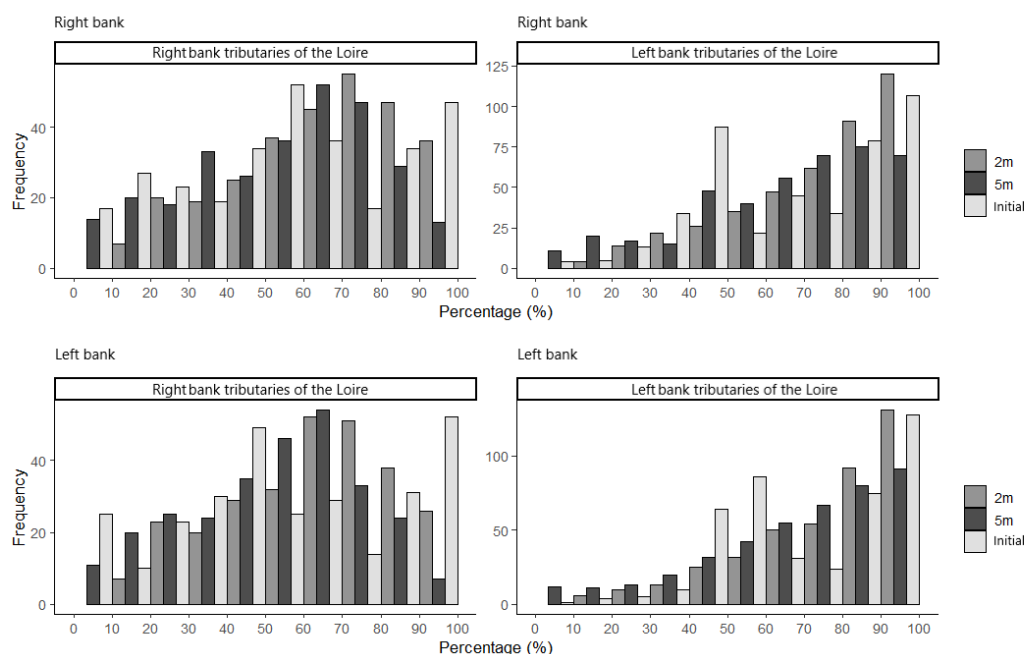


Figure 17 : Comparaison des méthodes de caractérisation de la densité de végétation : méthode initiale basée sur BD TOPO® (en gris clair) et nouvelle méthode basée sur la différence MNS-MNT avec deux seuils de détection de la végétation > 2 m en gris et > 5 m en gris foncé, pour les affluents rive gauche (ARGL) et rive droite (ARDL) de la Loire.

3.2.1.1 Comparaison des paramètres de la hauteur de végétation

La fréquence des hauteurs de végétation a été analysée séparément pour chaque rive (droite et gauche) des tronçons, afin d'examiner les différences de densité de végétation entre les affluents situés en rive droite et ceux situés en rive gauche de la Loire (Figure 18).

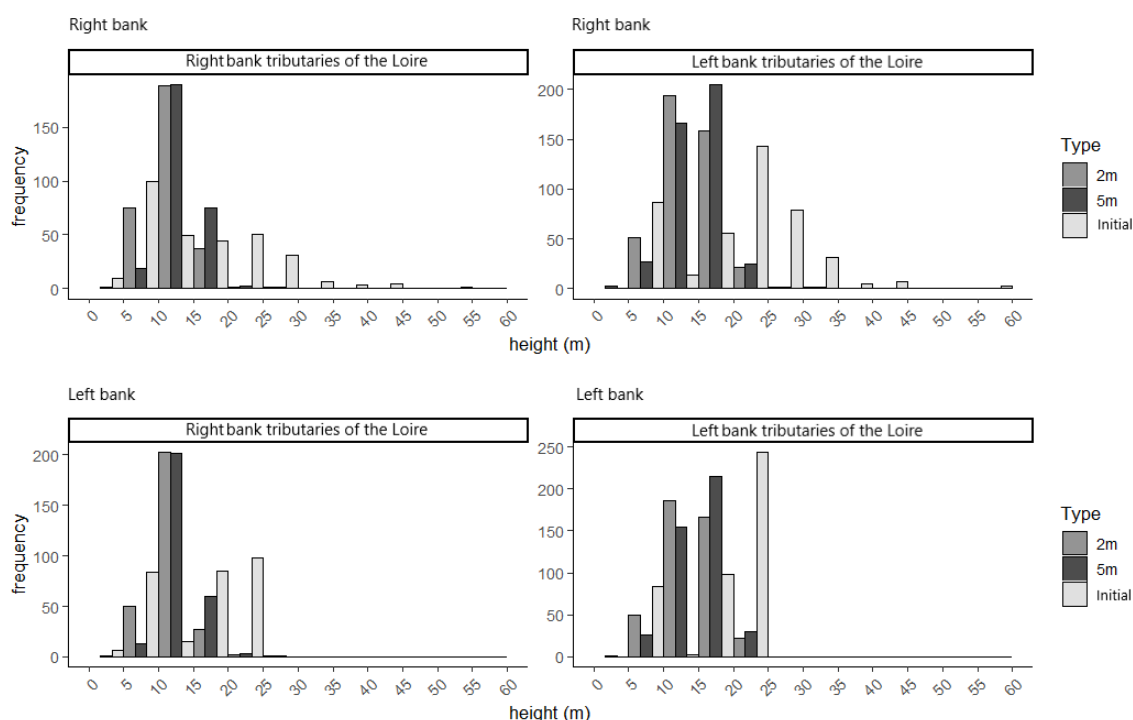


Figure 18 : Comparaison des méthodes de caractérisation de la hauteur de végétation : méthode initiale basée sur BD TOPO® (en gris clair) et nouvelle méthode basée sur la différence MNS-MNT avec deux seuils de détection de la végétation > 2 m en gris et > 5 m en gris foncé), pour les affluents de la rive gauche (ARGL) et les affluents de la rive droite de la Loire (ARDL).

La nouvelle méthode de caractérisation de la végétation, appliquée avec des seuils de détection de 2 m et 5 m, tend à réduire la hauteur moyenne de la végétation sur les deux rives de la Loire. Pour le seuil de 2 m, la hauteur moyenne est réduite de 5,46 m pour la ARGL, et de 3,58 m pour la ARDL. Cette réduction est encore plus marquée avec le seuil de 5 m, atteignant une moyenne de 6,49 m pour la ARGL et de 5,12 m pour la ARDL. Pour les ARDL, la classe de hauteur la mieux représentée par la méthode originale correspond à la plage 20-25 m, tant pour la rive droite que pour la rive gauche. En revanche, la nouvelle méthode de caractérisation met en évidence les classes de hauteur inférieures : entre 10 et 15 m avec un seuil de 2 m, et entre 2 m et 15 et 20 m avec un seuil de 5 m.

3.3 ANALYSES COMPARATIVES DES PERFORMANCES DU MODELE T-NET SELON LES DIFFERENTS METHODES DE CARACTERISATION DES PARAMETRES DE LA VEGETATION

Afin d'évaluer l'impact d'une représentation plus précise de la végétation sur la modélisation de la température de l'eau, cette section compare la performance du modèle T-NET selon deux méthodes de caractérisation du couvert végétal. L'objectif est de déterminer si cette amélioration de la description de la végétation permet une meilleure simulation de la température et d'identifier les paramètres influençant la performance.

3.3.1 Comparaison des performances entre les simulations

Les simulations réalisées avec la nouvelle méthode de caractérisation de la végétation montrent de meilleures performances globales que celles produites par la paramétrisation initiale. Comme le montre la figure 19, pour la majorité des stations de mesure, les erreurs (RMSE) associées à la nouvelle méthode sont inférieures à celles de la méthode initiale. Chaque point au-dessus de la diagonale représente une amélioration de la simulation avec la nouvelle méthode par rapport à l'approche initiale.

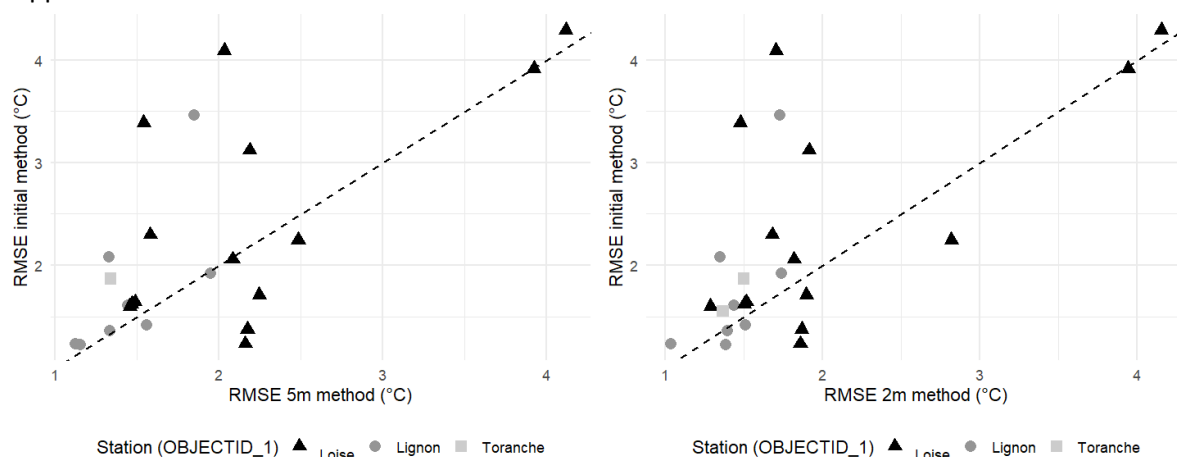


Figure 19 : Régression entre les erreurs (RMSE) des températures simulées et mesurées pour les stations des bassins du Lignon (cercles) issue de la Fédération de Pêche 42 et de la Loise (triangles) issue de INRAE RiverLy, selon la méthode initiale (BD Topage) et la nouvelle méthode (MNT-MNS) avec l'application de deux seuils de détection de la végétation (>2 m et > 5 m).

La comparaison des erreurs (RMSE) entre les simulations réalisées avec la nouvelle méthode de caractérisation (appliquée avec les deux seuils de détection) et celles résultant du paramétrage initial montre des performances très proches pour le bassin du Lignon et sont détaillées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Résumé des médianes de l'erreur (RMSE) des différentes simulations du modèle T-NET : la méthode initiale, qui se base sur la BD Topage et la nouvelle méthode qui se base sur la différence entre le MNS-MNT avec l'application de deux seuils de détection (> 2 m et > 5 m), sur le bassin versant du Lignon et de la Loise.

Bassin versant	RMSE (initiale) (°C)	Biais (°C)	Médiane RMSE (2m) (°C)	Biais (°C)	Médiane RMSE (5m) (°C)	Biais (°C)	Diff (ini-2m)	Diff (ini-5m)
Lignon	2.07	0.65	1.71	-0.28	1.72	-0.04	0.36	0.35
Loise	2.22	0.59	1.86	0.15	2.17	0.61	0.34	0.04

Avec les nouveaux paramètres, l'erreur médiane atteint 1,71°C pour un seuil de 2 m, soit une amélioration de 0,36°C par rapport à la simulation initiale. Pour le seuil de 5 m, l'erreur médiane est de 1,72°C, ce qui correspond à une amélioration de 0,35°C. On constate également une amélioration du biais, avec un changement de signe de 0,65°C pour la simulation initiale à -0,28 pour un seuil de 2m et -0,04 pour un seuil de 5m. Pour le bassin de la Loise, la nouvelle méthode de caractérisation de la végétation améliore les performances du modèle, notamment avec un seuil de détection de 2 m, pour lequel l'erreur médiane est de 1,86°C, soit une réduction de 0,42°C par rapport à la méthode initiale. Le seuil de 5 m présente une erreur plus élevée, à 2,27 °C, correspondant néanmoins à une amélioration de 0,29 °C.

3.3.2 Analyse de l'influence des paramètres en entrée du modèle sur les différences de performances

L'objectif de cette analyse est de comprendre quels sont les paramètres qui influencent le plus la différence de performance entre les deux méthodes de caractérisation de la végétation (2 m vs. 5 m) dans les bassins de la Loise et du Lignon (Tableau 5).

Tableau 5 : Résumer les relations significatives entre les différences d'erreur (RMSE) des simulations de température obtenues avec le modèle T-NET selon deux approches : l'une basée sur la BD TOPO® et l'autre basée sur la différence MNS-MNT, avec deux seuils de détection de la végétation (>2 m et >5 m) et les paramètres d'entrée du modèle.

Paramètre	Bassin versant	Scénario 2m			Scénario 5m		
		p-value	Corrélation Spearman	R ²	p-value	Corrélation Spearman	R ²
Pente	Le Lignon	< 0,001	0.579	0.39	< 0,001	0.483	0.41
Distance à la source	La Loise et ses affluents	0.003	0.607	0.16	0.005	0.581	0.16
	Le Lignon	< 0,001	-0.550	0.27	< 0,001	-0.549	0.32
Différence Pourcentage végétation	La Loise et ses affluents	x	x	0.53	0.02	0.478	0.59
	Le Lignon	< 0,001	0.622	0.23	< 0,001	0.586	0.23
Différence Hauteur de végétation	La Loise et ses affluents	0.01	-0.545	0.12	0.002	-0.617	0.17
	Le Lignon	x	x	x	0.01	-0.277	0.08
Débits	La Loise et ses affluents	0.02	0.505	0.01	0.04	0.436	0.02
	Le Lignon	< 0,001	-0.663	0.15	< 0,001	-0.739	0.21
Ordre de Strahler	Le Lignon	< 0,001	-0.593	0.33	< 0,001	-0.645	0.38

La densité de végétation est corrélée avec la différence d'erreur entre les scénarios 2 m et 5 m, notamment dans le bassin de la Loise où elle explique entre 23% et 59% de la variance ($R^2 = 0,53$ à $0,59$). Pour le scénario 5 m, la corrélation est modérément négative ($p = 0,48$, $p > 0,05$).

Dans le bassin du Lignon, la relation est un peu moins marquée, avec 23% de la variance expliquée ($R^2 = 0,23$), mais les corrélations de Spearman restent modérément négatives pour les deux seuils ($p = 0,59$ à $0,62$, $p < 0,001$). Ces résultats soutiennent l'idée que la représentation de la végétation affecte la performance du modèle en montrant que plus la variance du couvert végétal est importante entre les deux scénarios, plus la variation de l'erreur du modèle est importante. Comme les coefficients de Spearman sont tous positifs pour les différences d'erreur (RMSE), cela suggère que la différence d'erreur augmente lorsque la correction apportée à la végétation est plus importante.

En ce qui concerne la hauteur de la végétation, une corrélation faiblement négative est observée dans le bassin versant du Lignon, mais uniquement pour le seuil de 5 m ($p = -0,28$, $p = 0,01$). Aucun lien significatif n'est détecté pour le seuil de 2 m dans ce bassin versant. Dans le bassin de la Loise, par contre, les corrélations sont plus marquées : la hauteur de la végétation explique 12% à 17% de la variance des différences RMSE entre les deux seuils (p entre $0,59$ et $0,62$, $p < 0,01$), ce qui indique que des variations significatives de la hauteur de la végétation entre les seuils sont associées à des différences d'erreur plus importantes dans la performance du modèle. De manière surprenante, des corrélations significatives apparaissent également entre les différences d'erreur pour certains paramètres qui n'ont pas été modifiés entre les scénarios.

3.4 SCENARIOS DE RESTAURATION : ÉVALUATION DE L'IMPACT DE LA VÉGÉTATION SUR LA TEMPÉRATURE DE LA RIVIÈRE

Afin d'évaluer l'influence des différentes configurations du couvert végétal sur les températures simulées par le modèle, plusieurs scénarios de restauration ont été testés. Ces scénarios incluent une végétation maximale (100%), une absence totale de végétation (0%), et un scénario plus ciblé visant à restaurer uniquement les berges sud des sections les moins végétalisées. L'objectif est de déterminer la sensibilité du modèle aux changements de végétation et d'identifier les options de restauration les plus efficaces.

3.4.1 Description de la distribution de la végétation pour les différents scénarios

Les scénarios 100% et 0% de densité sont appliqués à tous les tronçons du bassin versant, soit un total de 706 tronçons. Le scénario visant les rives sud concerne spécifiquement les tronçons dont la densité initiale de végétation est inférieure à 60%. Pour la ARDL, il s'applique à 104 des 152 rives gauches avec un pourcentage de végétation inférieur à 60%, et à 14 des 155 rives droites. Pour la ARGL, ce scénario s'applique à 11 des 165 rives gauches avec un pourcentage de végétation inférieur à 60% et à 141 des 170 rives droites (Figure 20).



Figure 20 : Localisation des tronçons sélectionnés pour le scénario de restauration de la végétation ciblant les rives sud. Les tronçons ont été identifiés à partir du réseau T-NET en considérant une orientation comprise entre 22.5° et 157.5°C pour les rives droites, et comprise 202.5 et 337.5°C, pour les rives gauches. Seuls les tronçons présentant une densité de végétation initiale inférieure à 60% dans le modèle T-NET ont été retenus.

L'analyse de la densité de la végétation, en comparant le scénario ciblant les berges sud avec la situation initiale selon l'ordre de Strahler (Figure 21), montre que le scénario de restauration concerne principalement de petits tronçons, d'ordre de Strahler 1 et 2. Pour les ARDL, ces deux ordres représentent 92% des tronçons modifiés, soit 49% d'ordre 1 et 43% d'ordre 2, sur un total de 104

tronçons, principalement en rive gauche. Pour les ARGL, 91% des sections concernées appartiennent à ces deux ordres (59% d'ordre 1 et 32% d'ordre 2), sur un total de 141 sections, principalement sur la rive droite. Le scénario rive sud a un impact plus limité sur la densité de la végétation pour les tronçons d'ordre 4 et 5 de Strahler. Cela signifie que la plupart de ces tronçons sont déjà boisés. Il convient de noter que la ARGL ne comprend aucun tronçon de Strahler 4.

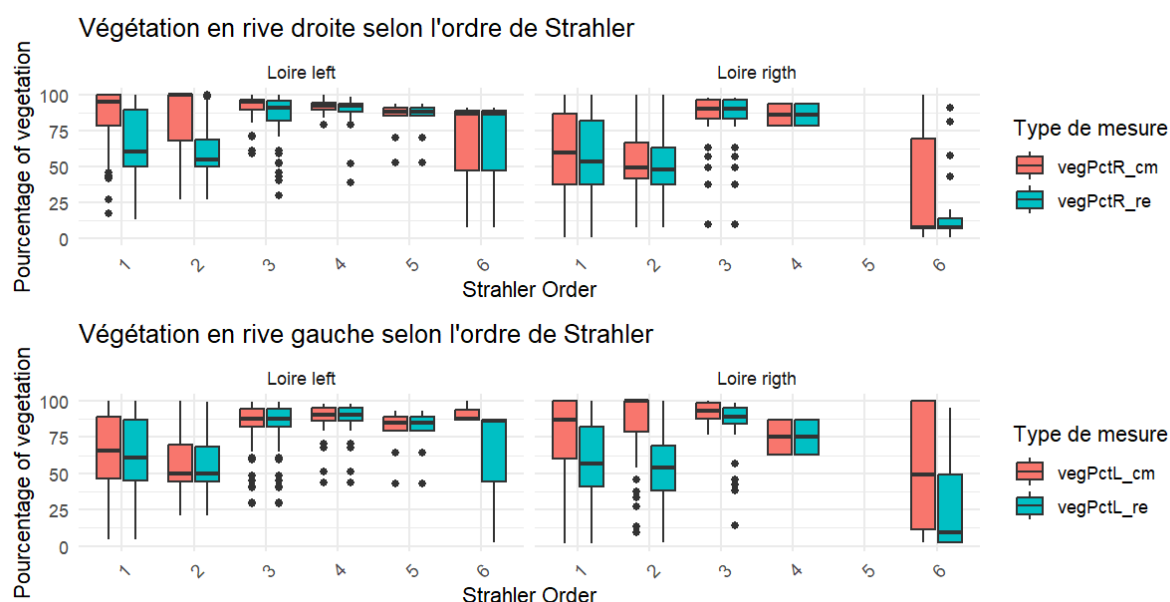


Figure 21 : Répartition du pourcentage de densité de végétation en rive gauche et droite de la simulation initiale basée sur la BD Topage (en bleu) et du scénario ciblant les rives sud (en rouge), selon les ordres de Strahler et en fonction du bassin versant.

3.4.2 Sensibilité du modèle au changement de la couverture de la végétation

L'application de scénarios de végétation impliquant des changements importants permet d'évaluer la sensibilité du modèle aux variations du couvert végétal. La figure 22 montre la comparaison des erreurs (RMSE) entre la simulation initiale et les scénarios de densité de végétation 100% et 0%. Dans le cas du scénario 100%, les valeurs de RMSE sont proches de celles obtenues avec le paramétrage initial. Les écarts sont faibles, avec des valeurs parfois légèrement inférieures, notamment pour certaines stations du bassin du Lignon.

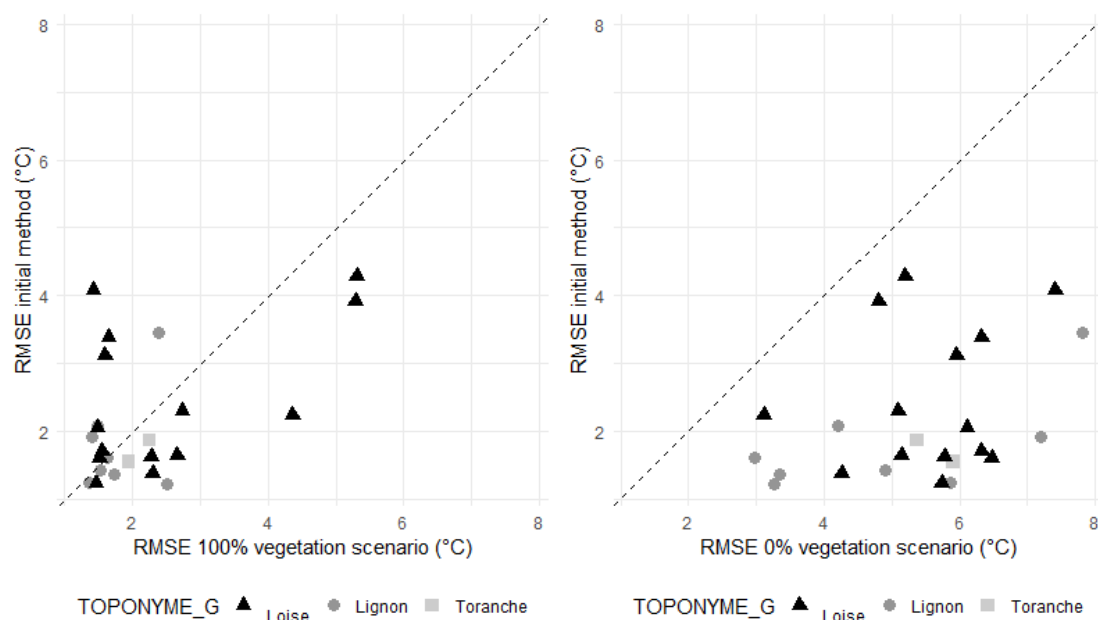


Figure 22 : Régression entre les erreurs (RMSE) issues des températures de l'eau simulées et mesurées pour les stations des bassins du Lignon (cercles, issue de INRAe RiverLy) et de la Loise (triangles, issue de la Fédération de Pêche 42), selon la simulation initiale avec un paramètre de densité de végétation basé sur la BD Topage et les scénarios de densité de végétation à 0 % et à 100%.

En revanche, le scénario 0% végétation conduit à une augmentation significative des erreurs pour la plupart des stations, notamment dans le bassin de la Loise. Les RMSE dépassent l'application de scénarios de végétation impliquant des modifications significatives, ce qui permet d'évaluer la sensibilité du modèle aux variations du couvert végétal, toujours les valeurs de la simulation initiale, traduisant une dégradation des performances du modèle en l'absence de couvert végétal.

Globalement, le scénario dans lequel toute la densité de végétation est supprimée (0%) conduit à une forte dégradation des performances du modèle, avec une augmentation des erreurs (RMSE) de 2,8°C pour le bassin versant du Lignon et de 3,81°C pour la Loise (Tableau 6). A l'inverse, le scénario dans lequel la densité de végétation est augmentée à son maximum, présente des performances proches de celles du paramétrage initial, avec une réduction de l'erreur de 0,06°C pour le Lignon et de 0,26°C pour la Loise.

Tableau 6 : Résumé des médianes de l'erreur (RMSE) des différentes simulations du modèle T-NET, un paramètre de densité de végétation initiale (basé sur la BD Topage) et les scénarios de densité de végétation à 0 % et à 100%.

Bassin versant	RMSE (initiale) (°C)	Biais (°C)	RMSE (0 %) (°C)	Biais (°C)	RMSE (100%) (°C)	Biais (°C)	Différence entre RMSE initiale - RMSE 0%)	Différence entre RMSE initiale -RMSE 100%)
Lignon	2.07	0.65	4.87	4.16	2.01	-0.93	-2.8	0.06
Loise	2.22	0.59	6.03	5.57	1.96	-1.30	-3.81	0.26

3.4.3 Impact des scénarios de gestion/restauration sur la température simulée

Les températures de l'eau simulées le 28 août 2018 montrent des variations importantes entre les trois scénarios de gestion de la végétation riveraine (figure 23 et tableau 7).

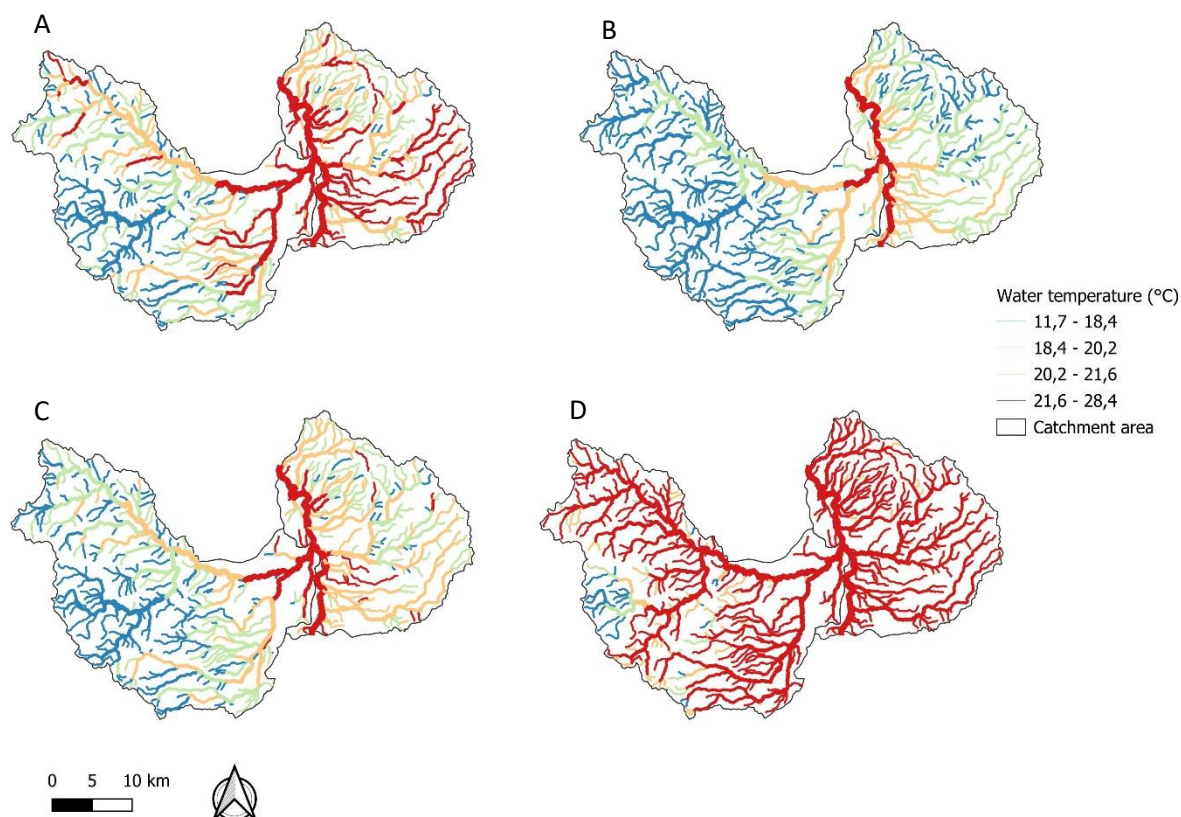


Figure 23 : Cartographie de la température de l'eau simulée pour le 28 août 2018 en fonction de différents scénarios de densité de végétation avec A = Simulation de la température la densité de végétation initiale, B = Scénarios de densité 100% pour tous les tronçons, C = Scénario de rive sud ou la densité de végétation de 100% sue sur les rives sud et D = Scénario 0% la densité de végétation est de 0 % pour tous les tronçons.

Tableau 7 : Analyse comparative des impacts des stratégies de gestion de la ripisylve sur la température de l'eau modélisée (journée estivale du 28 août 2018).

Scénario	Description	Densité de végétation (%)	Moyenne de température simulée (°C)	Différence avec scénario initial (°C)	Observations
Initial (référence)	Densité calculer à partir de la BD TOPO®	Densité « réelle » estimée	20.0°	0.0°C	Référence, hétérogénéité importante entre les sections
Suppression complète de la végétation	Suppression de toute végétation	0% sur les deux rives	23.7°C	+3.60C	Hausse significative des températures, scénario extrême
Restauration complète de la végétation	Ajout de toute la végétation	100% sur les deux rives	18.1°C	-1.9°C	Réduction maximale, mais peu réaliste dans la pratique
Restauration des rives sud	Restauration uniquement des berges orientées au sud pour les orientations sélectionnées	100% sur les rives sud <60% initial	19.2°C	-0.88°C	Bon compromis entre efficacité thermique et fonctionnalité

L'analyse des effets des scénarios de densité de végétation sur les températures simulées, réalisée pour la journée du 28 août 2018, sont analysés selon l'ordre de Strahler. Elle montre que le scénario avec une densité de végétation de 100% conduit à une baisse significative de la température médiane, particulièrement marquée dans les petits cours d'eau (ordre de Strahler 1 et 2) (Figure 24).

Les différences entre ce scénario et la température résultant de la simulation initiale vont de -2,61°C pour l'ordre de Strahler 2 à -0,84°C pour l'ordre de Strahler 5. Contrairement au scénario 100% végétation, l'absence totale de couverture végétale (scénario 0%) conduit à une augmentation marquée des températures simulées, en particulier dans les cours d'eau de taille moyenne (ordre 3 à 5 de Strahler), où les augmentations médianes peuvent atteindre près de +5°C. Par exemple, dans les tronçons d'ordre 4, l'augmentation médiane est de +5,59°C, alors que les rivières plus petites (ordre 1) présentent une augmentation moins prononcée de +3,25°C.

Pour l'ensemble du réseau, le scénario « rives sud » n'a pas d'effet notable sur la médiane des tronçons d'ordre 1 (écart médian nul). Par contre, il réduit significativement les températures des tronçons d'ordre 2, avec une baisse de -0,99°C pour la ARGL et de -1,44°C pour la ARDL. Cet effet diminue progressivement au fur et à mesure que l'ordre augmente, avec des réductions comprises entre -0,40°C et -0,20°C à partir de l'ordre 3. Lorsque l'analyse se limite aux tronçons modifiés par le scénario « rives sud », les effets sur les températures sont particulièrement sensibles pour les petits cours d'eau. Pour les tronçons d'ordre 1 à 3, la température médiane diminue en moyenne de -2,35°C (variant de -2,55°C à -2,05°C) tant pour la ARGL que pour la ARDL. Cet effet diminue avec l'augmentation de l'ordre, atteignant -0,82°C pour les ordres 4 et 5, et -0,40°C pour l'ordre 6.

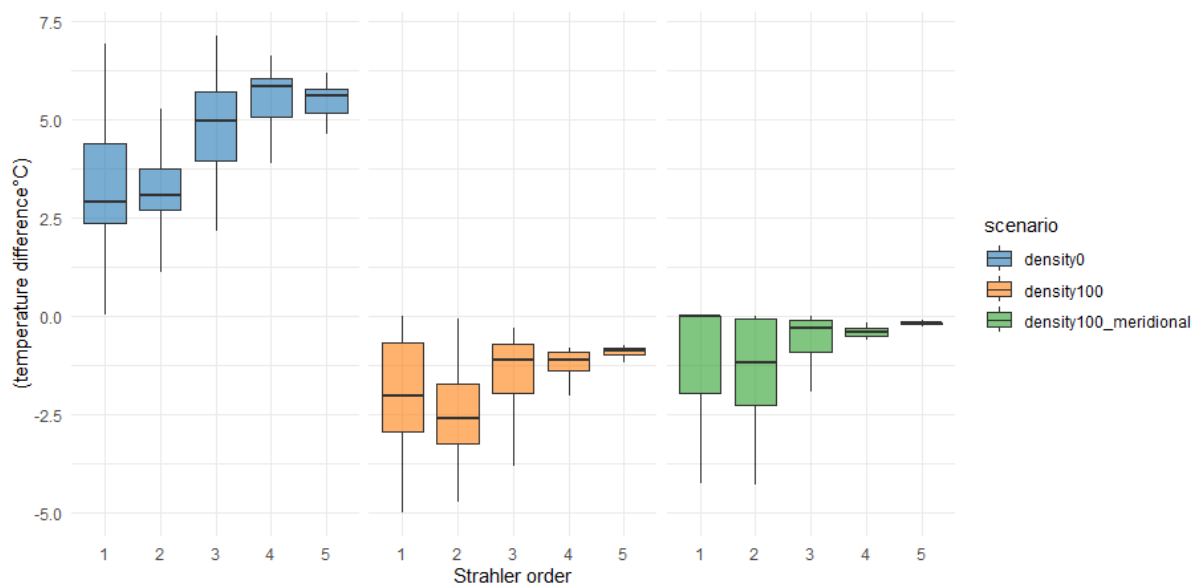


Figure 24 : Distribution des différences de température de l'eau entre les tronçons selon différents scénarios de restauration de la végétation riveraine avec : suppression totale de la végétation (paramètre de densité fixé à 0 %)(bleu) ; restauration maximale de la végétation sur les deux berges (densité fixée à 100 %)(orange) et restauration ciblée sur la rive sud uniquement (densité fixée à 100 % pour les tronçons avec densité initiale < 60 %)(vert), pour la journée d'été du 28 août 2018.

Les différences de température simulées le long des principaux cours d'eau montrent de nettes variations en fonction des scénarios de couverture végétale (Figure 25). Le scénario avec une densité de végétation de 100% entraîne systématiquement des températures simulées plus basses que le scénario initial, notamment pour les rivières Loise, Toranche et Vizézy. A l'inverse, le scénario sans végétation conduit à une augmentation de la température. Dans plusieurs cas (Garollet, Chanasson, La

Loise), il conduit à une réduction significative de la température, bien que moins marquée que le scénario 100%. De plus, la différence entre les scénarios tend à être plus importante à proximité des sources.

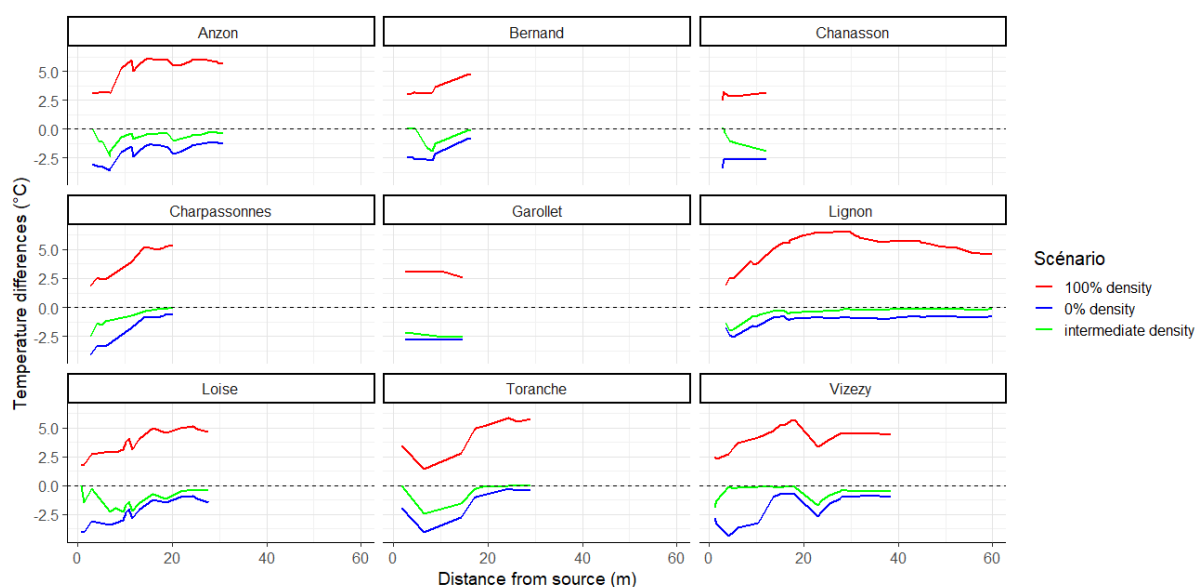


Figure 25 : Evolution des écarts de température simulée par le modèle T-NET le long des drains principaux des bassins versant pour la journée du 28 Août 2018 entre la simulation avec les paramètres de densité de végétation initiales (BD Topage) et les scénarios de densité de végétation à 0 % à 100% et ciblant les rives sud avec une densité initiale inférieure à 60%.

3.5 ANALYSES A L'ECHELLE LOCALE DES IMPACTS DE LA VEGETATION SUR LA LUMINOSITE ET LA TEMPERATURE

Afin de mieux comprendre les effets de la végétation riveraine à l'échelle locale, deux approches exploratoires ont été choisies : l'évolution de l'intensité lumineuse en fonction du type de couverture végétale et l'impact des zones non ombragées sur la température de l'eau. Ces analyses exploratoires ont permis de mettre en lumière les interactions entre la végétation, la lumière et la température, ainsi que leurs variations spatiales et temporelles au sein des différents tronçons étudiés.

3.5.1 Evolution de l'intensité lumineuse selon les types de couvertures végétales

L'évolution des enregistrements d'intensité lumineuse montre une différenciation entre la luminosité mesurée au début et à la fin de la période d'enregistrement, avec un changement notable autour du 11-14/04/11-14 (25/04/11 pour la Charpassonne, 25/04/12 pour le Lignon, 25/04/14 pour le Garollet). L'écart entre la zone sans végétation et les autres zones est plus important.

Pour une intensité maximale enregistrée de manière plus ou moins identique dans la zone sans végétation, utilisée comme référence pour l'intensité lumineuse reçue sur le tronçon, l'intensité mesurée dans la zone avec végétation varie avant et après cette date de transition, avec une différence plus marquée après qu'avant.

Par exemple, sur la Charpassonne (figure 26), la valeur de l'intensité lumineuse le 04/05 était de 115 734 lux dans la zone non végétalisée, alors que le 04/20 elle était de 121 245 lux.

La différence d'intensité maximale entre la zone sans végétation et la zone à végétation dense pour ces dates est de 16 534 lux le 04/05, contre seulement 99 201 lux le 04/20.

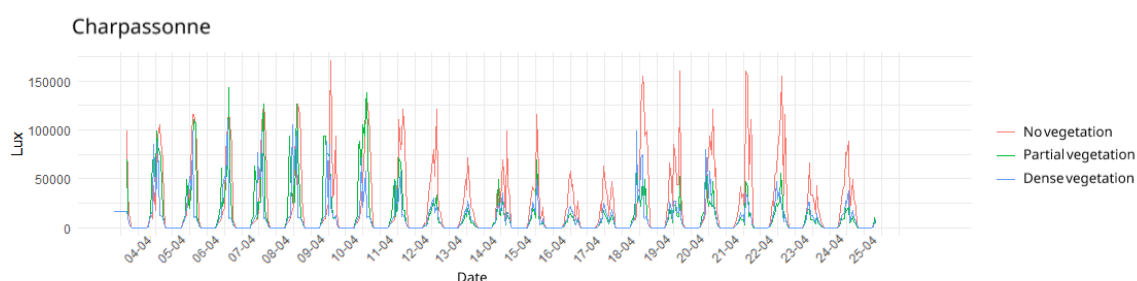


Figure 26 : Evolution temporelle de l'intensité lumineuse sur le site de Charpassonne en fonction du type de couvert végétal (dense (bleu), partiel (vert) ou absent (rouge)).

L'analyse des niveaux d'éclairement sur l'ensemble de la période, par site et par type de couvert végétal (figure 27), se concentre sur le troisième quartile (Q3), correspondant aux 25% de valeurs les plus élevées. Ce choix permet d'éliminer les très faibles valeurs mesurées la nuit, qui faussent la médiane et ne reflètent pas la lumière du jour réelle.

Les résultats indiquent une nette différence entre les différentes catégories de couvert végétal. En particulier, les variations d'intensité lumineuse entre les zones de végétation partielle et dense sont relativement faibles par rapport à celles entre ces zones et les zones sans végétation.

Par exemple, sur le site de Garollet, il y a une différence d'intensité de 6 528 lux (28 065 vs. 21 537 lux) entre la végétation dense et la végétation partielle. En revanche, l'écart entre la zone sans végétation et la zone à végétation dense est beaucoup plus important, atteignant 17 535 lux, et l'écart entre la végétation partielle et la zone sans végétation est de 11 007 lux.

Sur le Lignon, on observe une tendance similaire : la différence entre la végétation dense et la végétation partielle est plus faible, avec 1.530 lux (37.830 - 36.300 lux), tandis que les différences entre

les zones sans végétation et celles avec une végétation dense ou partielle sont respectivement de 30.148 lux et 28.618 lux.

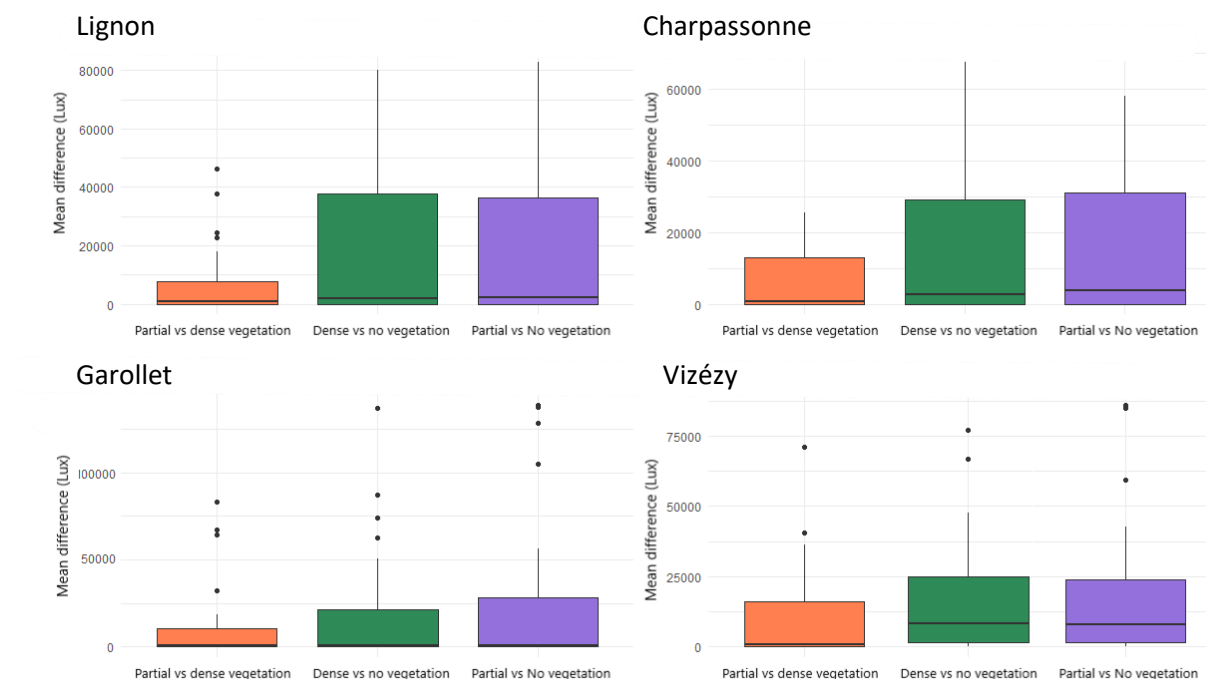


Figure 27 : Comparaison des variations d'intensité lumineuse en fonction du type de couvert végétal (dense, partiel, absent) sur les sites de Garollet, Lignon, Vizézy et Charpassonne, sur la période commune du 4 mars au 3 avril 2025.

3.5.2 Impact des zones non ombragées sur la température de l'eau

La température de l'eau des cours d'eau est fortement influencée par la présence ou l'absence de végétation riveraine, qui modère l'exposition solaire. Pour évaluer cet impact, une comparaison des températures enregistrées par les sondes placées avant et après la zone sans végétation a été réalisée sur les ruisseaux du Garollet et de la Charpassonne. La figure 28 ci-dessous illustre la répartition spatiale des sondes de température le long du tronçon d'étude, ainsi que la segmentation du tronçon du Garollet en fonction de la présence ou de l'absence de végétation riveraine. Cette configuration permet d'évaluer l'impact différentiel du couvert végétal sur la température de l'eau.

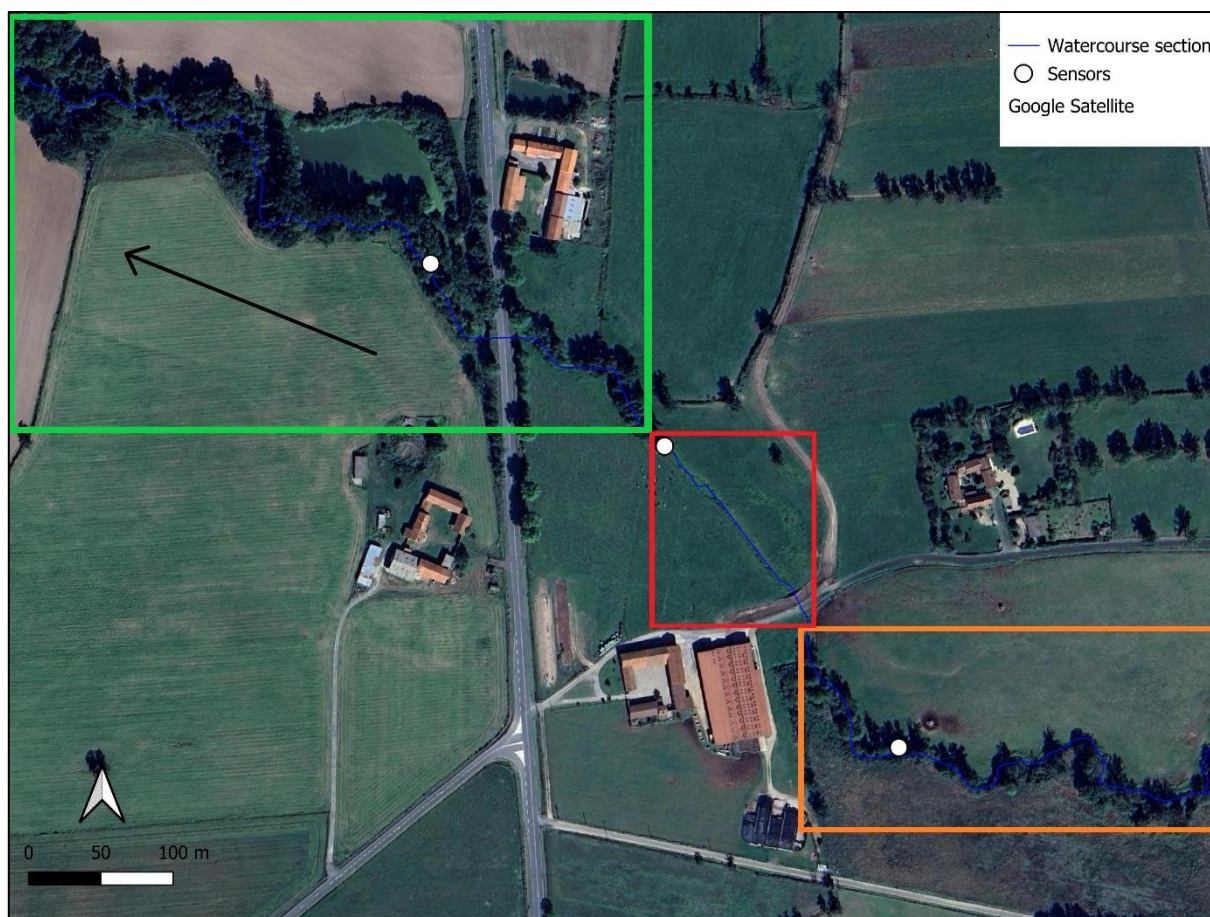


Figure 28 : Emplacement des sondes de température (cercle blanc) et découpage du linéaire en fonction du couvert végétal riverain, avec une section du cours d'eau bordée de végétation d'environ 400 m de long (orange), suivie d'une zone sans végétation d'environ 160 m de long (rouge), puis d'une nouvelle section où la végétation riveraine est à nouveau présente (vert). Le sens d'écoulement est indiqué par la flèche noire.

La figure 29 montre l'évolution des températures dans les secteurs présentant des discontinuités de végétation avec une sonde de température de l'eau avant et après un tronçon dépourvu de végétation. Pour la Charpassonne, la température moyenne avant la section dépourvue de végétation est de 14,2°C, contre 14,5°C après cette section (Figure 27). La différence médiane des températures maximales entre les secteurs non végétalisés et la section avec végétation est de -0,32°C, tandis que celle des températures minimales atteint -0,37°C sur la période étudiée.

Pour le Garollet, la température moyenne avant le tronçon non végétalisé était de 15,3°C, contre 16,0°C après. La différence entre les tronçons est de -0,79°C pour la température maximale moyenne et de -0,49°C pour la température minimale moyenne. Par contre, la différence entre les médianes des températures minimales est moins marquée, atteignant 0,21°C.

Sur ce site, la présence d'une sonde thermique située après la section dépourvue de végétation, dans une section nouvellement ombragée, montre un faible impact sur l'augmentation de la température maximale avec une différence entre les températures maximales de 0,03°C entre ces sections, mais une plus grande différence dans les médianes des températures minimales atteignant 0,21°C.

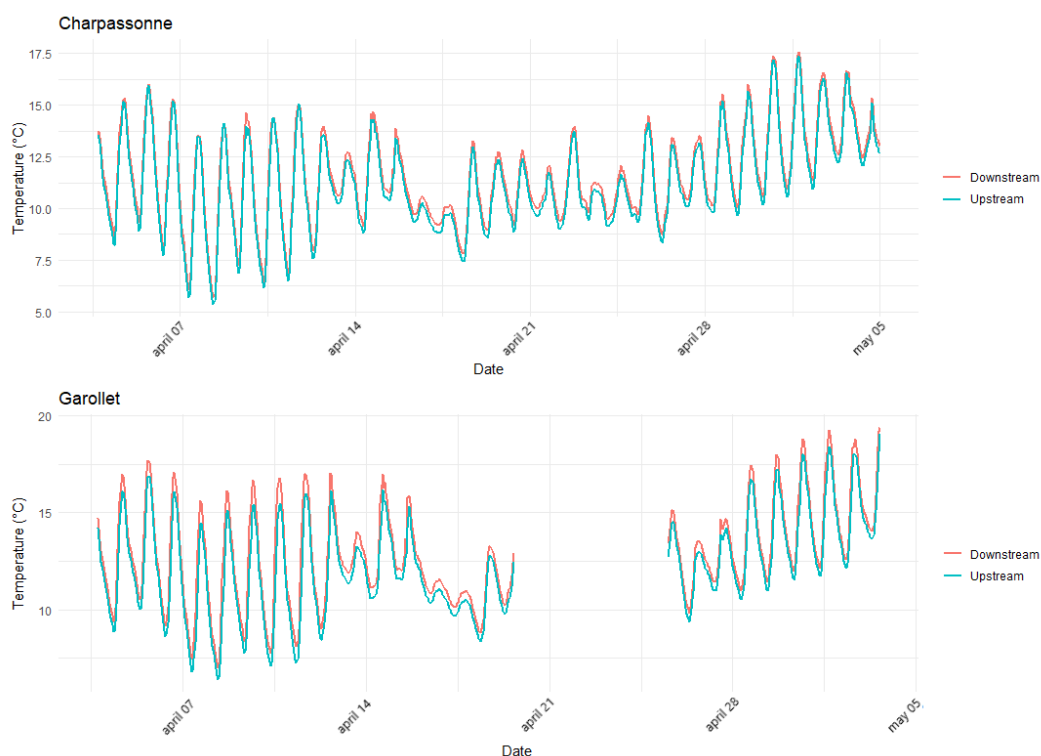


Figure 29 : Evolution de la température de l'eau mesurée par des sondes thermiques en amont et en aval des zones sans végétation, sur une distance d'environ 180 m pour le site de Charpassonne (A) et 176 m pour le site de Garollet (B), sur la période commune du 1er avril au 5 mai 2025.

La figure 30 montre l'évolution des températures horaires moyennes pour les stations de Charpassonne, Lignon et Garollet. Cette analyse montre que les zones sans couvert végétal ont systématiquement des températures de l'eau plus élevées durant la journée que celles observées dans les secteurs à couvert dense ou partiel. Les zones à végétation dense sont plus fraîches, suivies par les zones à végétation partielle, tandis que les zones sans végétation sont les plus chaudes.

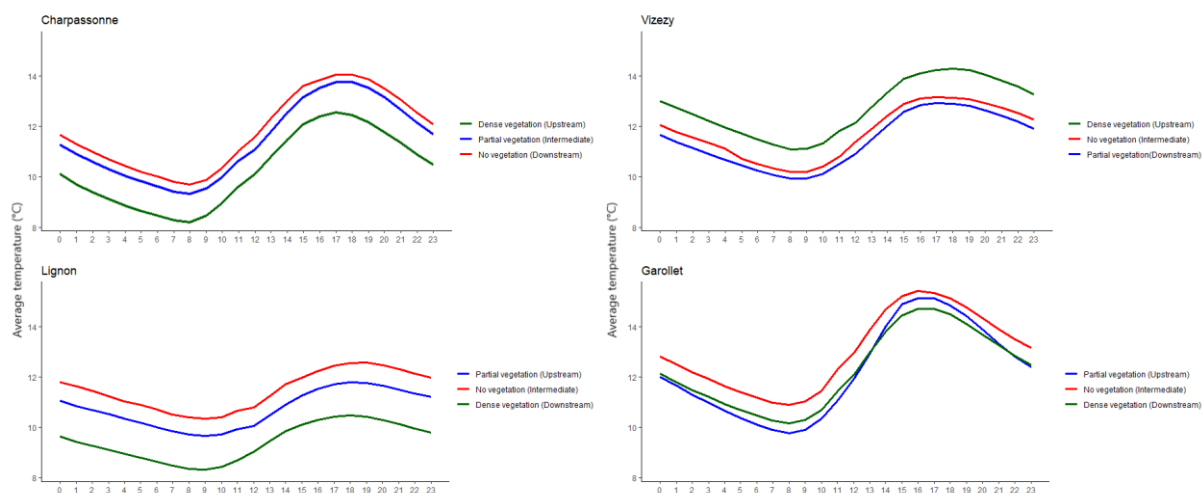


Figure 30 : Evolution des températures horaires moyennes de l'eau entre le 4 mars et le 3 avril 2025, en fonction du type de couverture végétale (absente (rouge), partielle (bleue) et dense (verte)) sur les sites de Charpassonne, Graollet, Vizézy et Lignon.

Par exemple, sur la Charpassonne, la différence moyenne de température entre les zones à végétation dense et les zones à végétation partielle est de 1,16°C, avec des variations allant de 0,98°C à 1,37°C. La différence moyenne entre les zones à végétation dense et les zones sans végétation est de 1,55°C, avec une plage de variation allant de 1,40°C à 1,74°C.

Cette tendance n'existe toutefois pas sur le site du Vizézy, où la température de l'eau mesurée dans la zone à végétation dense est plus élevée que dans les zones à végétation partielle ou inexistante.

De même, sur le site de Garollet, les températures de l'eau mesurées sous couvert végétal dense et partiel se croisent au cours de la journée : entre 0 h et 12 h, la température est plus élevée sous couvert végétal dense, tandis que de midi à 21 h, la température devient plus élevée sous couvert végétal partiel.

4 DISCUSSION

4.1 SENSIBILITE THERMIQUE LOCALE ET LIMITES DE LA MODELISATION

La modélisation des températures sur l'ensemble du bassin d'étude, à partir du paramétrage initial (issu de la BD TOPO®), montre une tendance thermique cohérente avec les tendances régionales, bien que plus importante. En effet, l'augmentation simulée par le modèle T-NET s'élève à +0,44°C par décennie sur la période annuelle, soit un taux similaire à celui observé pour la période estivale sur l'ensemble du bassin versant de la Loire (Seyedhashemi et al., 2022).

La période estivale met en évidence une tendance globale au réchauffement qui atteint même +0,59°C par décennie pour le bassin inférieur étudié, avec un maximum à ARDL (+0,63°C par décennie). Ces résultats démontrent que le bassin étudié a une sensibilité thermique élevée, en particulier en été, et renforcent la nécessité de travailler à des résolutions spatiales plus locales pour identifier les impacts du changement climatique sur la température de l'eau.

Cependant, le test de performance du modèle à l'échelle du bassin d'étude, constitué principalement de petites rivières (< 30km de la source), montre des erreurs plus importantes que celles observées pour des rivières similaires à l'échelle de l'ensemble du bassin versant de la Loire. L'analyse des performances montre une erreur médiane estivale (juin, juillet, août) de 1,74°C, avec 1,71°C pour le bassin du Lignon et 1,76°C pour le bassin de la Loire, contre une fourchette plus réduite de 0,52°C à 0,91°C pour des rivières comparables à l'échelle du bassin de la Loire (Seyedhashemi et al., 2022). Ces différences soulèvent des questions sur la robustesse du modèle à petite échelle et sur les sources potentielles de biais et d'incertitudes.

L'analyse des performances montre une erreur estivale médiane (juin, juillet, août) de 1,74°C, avec 1,71°C pour le bassin du Lignon et 1,76°C pour le bassin de la Loire, contre une fourchette plus réduite de 0,52°C à 0,91°C pour des rivières comparables à l'échelle du bassin de la Loire (Seyedhashemi et al., 2022). Ces différences soulèvent des questions sur la robustesse du modèle à petite échelle et sur les sources potentielles de biais et soulignent l'importance de tester la performance du modèle à l'échelle locale.

De nombreux éléments peuvent être avancés pour expliquer ces erreurs. L'un des facteurs les plus déterminants est la présence répétée de périodes sèches, en particulier dans le bassin de la Loire. Ces périodes sèches sans débit s'étendent jusqu'à 80 jours sur certaines stations INRAE (RiverLy) (Moatar et al., 2022), ce qui perturbe la comparaison entre la température de l'eau et les températures simulées. En effet, les capteurs mesurent la température de l'air au lieu de la température de l'eau, ce qui crée un écart important dans l'évaluation de la performance du modèle. En outre, il existe des différences entre les appareils de mesure et les données. Les capteurs des stations de l'INRAE et ceux de la Fédération de pêche 42 ne sont pas identiques, de sorte que des divergences peuvent être observées dans certaines données. Il faut également tenir compte de la période et de la fréquence des enregistrements : les stations de l'INRAE sont beaucoup plus récentes et axées sur l'été (2019-2020), alors que celles de la Fédération de Pêche 42 sont annuelles sur une période plus longue (2009-2022). Compte tenu de ces limites, des améliorations sont possibles. Le retraitement des données par des méthodes de détection et de filtrage des valeurs aberrantes permettrait d'améliorer la qualité des données de température. Des approches comme celle proposée par Beaufort et al. (2020) offrent des outils pour identifier les valeurs aberrantes sur la Loire, bien que ces méthodes ne permettent pas de corriger toutes les anomalies présentes dans la série.

4.2 AVANTAGES ET LIMITES DE LA NOUVELLE METHODE DE CARACTERISATION DE LA VEGETATION

L'introduction de la nouvelle méthode de caractérisation de la végétation, basée sur la différence entre le MNT et le MNS, représente une amélioration significative dans la description de la couverture végétale. Contrairement à la méthode originale, qui utilisait la BD TOPO® et appliquait des hauteurs statiques en fonction du type de végétation, cette nouvelle méthode permet de représenter une plus grande variabilité et davantage de végétation dans un environnement limité en données à l'échelle locale. Elle offre une meilleure estimation de la densité et de la hauteur de la végétation et donc de l'ombrage associé. En revanche, la méthode originale surestimait systématiquement la hauteur de la végétation. Les nouveaux paramètres tiennent compte de la végétation qui est suspendue directement au-dessus du cours d'eau (un élément qui avait été omis dans la méthode initiale). Cela pourrait être intéressant à l'échelle d'une plus grande rivière pour déterminer si elle joue un rôle déterminant dans la régulation de la température de l'eau.

Cependant, même avec ces améliorations, des limites méthodologiques subsistent pour cette étude, limites basées sur la qualité des données de base. Par exemple, le MNT de 1 m, relativement précis, comporte des erreurs locales, et l'interpolation à 25 m dans certaines zones du bassin n'a certainement pas amélioré la précision et risque d'introduire des inexactitudes. Ces imprécisions peuvent affecter l'évaluation précise du relief et, par conséquent, la hauteur réelle de la végétation.

En outre, le MNS inclut toutes les caractéristiques de surface, y compris les caractéristiques créées par l'homme telles que les bâtiments. Dans les environnements urbanisés, cela peut conduire à une surestimation de la densité et/ou de la hauteur du couvert végétal, ce qui peut fausser le calcul des paramètres de végétation et limiter la pertinence générale des scénarios simulés sélectionnés. Bien que les bâtiments puissent créer de l'ombre, dans ces situations, il est probable que les pourcentages de végétation testés par le modèle ne reflètent pas exactement des scénarios de développement réalistes et, par conséquent, restreignent les limites opérationnelles des simulations dans certaines zones. Il est possible de vérifier et d'exclure les toits, afin de limiter ce type d'erreur dans les zones urbaines très développées, en utilisant la hauteur des bâtiments du MNS avec la couche de hauteur de l'information géographique sur les bâtiments.

4.3 OPTIMISER LES PERFORMANCES DU MODELE T-NET EN CARACTERISANT MIEUX LE COUVERT VEGETAL

Dans l'ensemble, l'intégration de la nouvelle méthode de caractérisation de la végétation a conduit à une nette amélioration de la performance du modèle T-NET. Ceci se traduit par une réduction significative de l'erreur médiane (RMSE) et du biais entre la température simulée et la température mesurée. Cette amélioration est particulièrement marquée lorsqu'un seuil de détection de la végétation supérieur à 2 m est utilisé, avec une réduction de l'erreur de 0,36°C pour le Lignon et de 0,34°C pour la Loise. Toutefois, une légère tendance à la sous-estimation des températures est observée avec ce seuil (-0,28°C), un biais moins marqué avec le seuil de 5 m (-0,04°C).

Dans le cas du bassin du Lignon, l'amélioration des performances semble être principalement liée à une représentation plus précise de la densité de la végétation riveraine. Cette sensibilité peut s'expliquer par les caractéristiques de l'occupation du sol, qui est dominée par des plantations et des activités forestières. Des travaux antérieurs ont montré que ces usages influencent fortement la structure du couvert végétal et les régimes thermiques des cours d'eau (Lynch et al., 1984 ; Wilkerson

et al., 2006). Dans ce contexte, la nouvelle méthode permet de mieux capturer la variabilité spatiale du couvert, fournissant ainsi une représentation plus précise des effets locaux de la végétation.

Pour le bassin versant de la Loise, les améliorations semblent résulter d'une meilleure prise en compte de la densité et de la hauteur de la végétation. Cependant, comme mentionné précédemment (section 4.1), la performance du modèle est susceptible d'être biaisée par la présence fréquente de sécheresses dans les séries de températures, ainsi que par la couverture temporelle limitée des données.

Dans ce contexte, la nouvelle méthode permet de mieux capturer la variabilité spatiale de la couverture, fournissant ainsi une représentation plus précise des effets locaux de la végétation.

Pour le bassin versant de la Loise, les améliorations semblent résulter d'une meilleure prise en compte de la densité et de la hauteur de la végétation. Cependant, comme mentionné précédemment (section 4.1), la performance du modèle est susceptible d'être biaisée par la présence fréquente de sécheresses dans les séries de températures, ainsi que par la couverture temporelle limitée des données.

Les résultats mettent également en évidence les limites de la méthode initiale, qui ne permettait pas de représenter de manière satisfaisante la complexité du couvert végétal. Le seuil de 2 m semble particulièrement adapté aux petites rivières, où même une végétation basse peut suffire à générer un ombrage efficace (Rutherford et al., 1997). En revanche, sur des rivières plus larges ou dans d'autres contextes morphologiques, les différences de performance entre les seuils de 2 m et de 5 m pourraient être inversées ou atténuées. Il conviendrait donc de tester ces approches afin d'évaluer leur robustesse et leur pertinence.

Par ailleurs, l'analyse de l'impact de différents facteurs sur les différences d'erreurs observées montre de manière surprenante un effet significatif de certains paramètres qui n'ont pourtant pas été modifiés entre les scénarios. Ceci soulève la question suivante : la méthode de caractérisation de la végétation et le choix du seuil de détection (2 m ou 5 m) modifient-ils l'influence relative des autres paramètres du modèle ?

4.4 SCENARIOS DE RESTAURATION : QUEL SONT LES LEVIERS EFFICACES POUR LIMITER LE RECHAUFFEMENT DES RIVIERES ?

Les simulations de la température de l'eau avec les scénarios 0% et 100% mettent en évidence la grande sensibilité du modèle T-NET aux variations du couvert végétal riverain, avec des réponses thermiques cohérentes selon les différents scénarios de gestion/restauration testés. Cette sensibilité confirme la capacité du modèle à prendre en compte les effets de la présence, de la densité et de la disposition spatiale de la végétation sur les températures de l'eau.

L'effet de l'ombrage varie en fonction de l'orientation du cours d'eau. Garner et al. (2017) ont démontré que la végétation sur la rive sud produit un ombrage plus efficace pendant les heures les plus chaudes. Ceci est cohérent avec les résultats obtenus ici, où le scénario ciblant les berges sud induit une réduction mesurable des températures dans les tronçons concernés, bien que moins marquée que celle obtenue avec une végétalisation complète des tronçons. Cet effet reste néanmoins significatif pour les petits cours d'eau (ordre 1 et 2 de Strahler), où une végétation unilatérale sur la rive sud suffit à fournir un ombrage efficace, limitant le réchauffement.

A l'échelle des tronçons principaux, le scénario simulant une densité maximale de végétation (100%) apparaît plus efficace pour réduire les températures, en particulier dans les têtes de bassin versant.

Enfin, il faut noter que dans cette étude, seules les températures moyennes journalières ont été analysées. Or, plusieurs études montrent que la végétation riveraine a un effet encore plus important sur les températures maximales de l'eau (Bowler et al., 2012). Il serait donc pertinent et intéressant

d'évaluer l'effet des différents scénarios sur les températures maximales journalières, pour lesquelles une réduction encore plus importante peut être attendue.

4.5 ANALYSES A L'ECHELLE LOCALE

A l'échelle locale, l'analyse de l'évolution de la luminosité met en évidence des dates de transition, au cours desquelles les différences entre zones végétalisées et non végétalisées s'accroissent. Ces variations coïncident probablement avec le développement des feuilles qui réduisent la lumière traversant la canopée (Konarska et al., 2013 ; Lintunen et al., 2013). L'analyse des différences d'intensité lumineuse montre une nette différence entre les zones sans végétation et celles avec un couvert végétal, qu'il soit partiel ou dense. Cependant, la différence entre la végétation dense et la végétation partielle reste faible. Ce résultat va à l'encontre de l'hypothèse initiale qui prévoyait une différence plus importante entre les zones denses et les zones à végétation partielle. Cette divergence peut s'expliquer en partie par des facteurs contextuels. Par exemple, sur le site de Charpassonne, une homogénéité notable de la végétation riveraine a été observée entre les différents sites de mesure, notamment au moment du développement du houppier. Certains secteurs, initialement caractérisés comme densément végétalisés lors de leur sélection en hiver (période sans feuilles), se sont retrouvés avec une largeur de houppier comparable à celle de secteurs partiellement végétalisés une fois que la végétation s'est développée. De plus, la période d'enregistrement ayant eu lieu au printemps, le développement des feuilles n'était pas terminé, ce qui peut expliquer la moindre différence entre les deux zones. Ces observations suggèrent qu'à cette période de l'année (fin de l'hiver, début du printemps), où le rayonnement solaire pénètre plus facilement la végétation (Hutchison & Matt, 1977), la seule présence de la végétation riveraine, quel que soit son degré de densité, est le principal facteur limitant l'intensité lumineuse incidente. Le rôle modulateur du couvert végétal semble donc s'exprimer plus clairement à cette époque de l'année par l'effet de présence/absence que par les variations de densité.

Cependant, certaines limites des données doivent être soulignées : la fréquence élevée des épisodes pluvieux et nuageux a réduit le nombre de jours de luminosité optimale, limitant ainsi la comparaison entre les zones. De plus, des inondations ont submergé certains capteurs, perturbant les mesures de l'intensité lumineuse et de la température de l'air. Ces facteurs limitent l'interprétation des résultats, qui sont exploratoires, et justifient des campagnes supplémentaires pour augmenter la fiabilité des données.

Il serait utile de répéter ce type d'expérience en été, lorsque la végétation est pleinement développée et relativement statique, et que son effet d'atténuation du rayonnement solaire est potentiellement plus marqué. Cette approche permettrait d'évaluer dans quelle mesure la densité de la canopée influence réellement la réduction de l'intensité lumineuse pendant les périodes de fort ensoleillement, et comment celle-ci affecte la température de l'eau. De plus, l'intégration de paramètres supplémentaires tels que la largeur de la végétation riveraine et la nature du couvert végétal (Feuillus vs. Conifères) permettrait d'enrichir l'analyse. En effet, plusieurs études ont montré que les types de forêts ont des capacités d'atténuation de la lumière et de la chaleur différentes, liées à leur phénologie et à la densité des feuilles (Dugdale, 2016 ; Konarska et al., 2013 ; Lintunen et al., 2013).

A l'échelle locale, les sites étudiés présentent des différences significatives de température de l'eau entre les zones ombragées et non ombragées, sur de courtes distances (environ 170 m), même si ces différences moyennes et maximales restent modérées (environ 0,5°C).

Elles sont en accord avec celles de Kalny et al. (2017), qui ont observé des différences de températures maximales allant jusqu'à 4°C suite à des discontinuités de végétation plus longues (environ 6 000 m).

lors d'épisodes de canicule. Ces résultats suggèrent que les discontinuités de végétation, même sur de faibles distances, peuvent provoquer des variations de température.

L'inversion de température observée sur le site du Garollet pourrait s'expliquer par l'asymétrie du couvert végétal entre les deux rives. La rive gauche est végétalisée, tandis que la rive droite est partiellement végétalisée. Cette configuration, combinée à l'orientation est-ouest du cours d'eau, entraîne une variation de l'ombrage liée à la course du soleil. Ce constat met en évidence certaines limites méthodologiques liées au positionnement des sondes par rapport à la végétation riveraine. Dans les sections du bassin, de nombreux sites présentent une végétation riveraine unilatérale et/ou une déconnexion verticale entre la berge et le cours d'eau (avec des berges qui forment des murs), de sorte que l'ombrage mesuré par les luxmètres en surface peut ne pas être associé uniquement à la végétation.

Il serait pertinent de réaliser la même expérience en été dans des conditions météorologiques extrêmes, afin de mieux quantifier l'impact de la fragmentation ou de l'absence de végétation riveraine sur la température de l'eau dans des zones non ombragées sur de courtes distances, ce qui est fréquemment le cas dans le bassin d'étude. De plus, lors des périodes de crues enregistrées, la variabilité journalière de la température était globalement moins prononcée, bien que les différences entre la zone sans végétation et les autres restaient détectables. Cette observation soulève la question de l'influence variable du rayonnement solaire en fonction du débit du cours d'eau.

4.6 IMPLICATION OPERATIONNELLE POUR LA GESTION DES COURS D'EAU

Cette étude a un certain nombre d'implications opérationnelles importantes pour les gestionnaires de rivières dans leurs initiatives de restauration des rivières, en particulier dans le contexte du changement climatique.

La nouvelle méthode apporte des améliorations significatives dans la caractérisation de la couverture végétale, fournissant aux gestionnaires un outil plus précis, plus complet et plus standardisé pour visualiser la hauteur et la densité de la végétation riveraine à l'échelle du bassin versant. Cette méthode est adaptable à différents contextes grâce à des seuils de détection ajustables. Cette meilleure connaissance spatiale permet d'identifier plus efficacement les zones prioritaires pour des actions de gestion ou de restauration.

Des simulations de différents scénarios montrent qu'une restauration même partielle de la densité de la végétation riveraine peut avoir un impact significatif sur les températures de l'eau. Cela ouvre la voie à des stratégies de gestion moins coûteuses mais efficaces en donnant la priorité aux tronçons les plus sensibles. Par exemple, la revégétalisation des berges orientées vers le sud offre un compromis réaliste lorsque les contraintes d'espace ou de terrain limitent l'ensemble des actions de reboisement. Le scénario « sans végétation » peut également être utilisé comme outil d'alerte pour anticiper les effets d'une dégradation de la végétation riveraine (urbanisation, maladie, sécheresse, etc.).

L'analyse montre que même sur de courtes distances (160 m), les discontinuités végétales peuvent conduire à des augmentations locales de température au printemps. Cela souligne l'importance pour les gestionnaires d'identifier, de prévenir ou de corriger ces ruptures de continuité, afin de limiter les effets négatifs.

En outre, le modèle T-NET s'avère être un outil utile pour la planification des actions de gestion. Il permet de tester des scénarios de gestion avant leur mise en œuvre, en quantifiant les bénéfices attendus et en visualisant dans l'espace les zones les plus sensibles ou celles qui présentent les défis thermiques les plus importants. Leur validation sur des bassins plus petits peut confirmer leur fiabilité et donc leur utilisation.

5 CONCLUSION

L'objectif de cette étude était d'enrichir notre compréhension du rôle de la végétation riveraine, et de sa représentation dans le modèle T-NET, sur la température de l'eau observée et simulée. Cette recherche a permis de valider l'application du modèle T-NET à des bassins versants plus petits. En outre, un paramètre de végétation amélioré a été proposé, basé sur des données d'élévation plus fines (MNS/MNT).

Les résultats montrent que cette nouvelle méthode, plus précise que celle basée sur la BD TOPO®, améliore la qualité des simulations, notamment en corrigeant une tendance à la surestimation des hauteurs observées, et en se rapprochant de la réalité. En matière de gestion, les scénarios testés montrent que même des mesures ciblées, comme le reboisement des berges sud, peuvent avoir une influence mesurable sur la température de l'eau, tout en limitant les contraintes foncières. En revanche, l'élimination complète du couvert végétal augmente sensiblement le réchauffement, ce qui souligne le rôle régulateur essentiel de la végétation riveraine.

Les observations de terrain, quant à elles, confortent l'idée que ce n'est pas seulement la densité de la végétation qui compte, mais aussi sa présence, surtout au printemps. Même sur de courtes distances, une rupture du couvert peut suffire à provoquer un réchauffement local de la température de l'eau, un signal important pour les gestionnaires qui cherchent à maintenir ou à restaurer la continuité écologique.

Certaines limites sont cependant à prendre en compte. Les données disponibles sur le terrain sur la Loire peuvent parfois être faussées, en raison des fréquentes périodes d'assèchement. De plus, la campagne de mesure s'est déroulée lors d'un printemps particulièrement nuageux et humide, ce qui a pu atténuer les effets d'ombrage observés.

Afin de mieux évaluer les conséquences du changement climatique sur les variations thermiques du territoire, il serait souhaitable de poursuivre l'enregistrement des températures de l'eau, notamment en été. L'extension du réseau de sondes thermiques à l'ensemble des bassins versants permettra d'enrichir la base de données existante et de développer des comparaisons et des validations plus précises des températures simulées et observées. Des recherches sur l'impact des discontinuités végétales sur le fonctionnement local des bassins versants pourraient également être poursuivies, à la fois en été et avec différentes distances de rupture, afin de mieux comprendre le rôle de ces discontinuités dans ces variations thermiques.

Enfin, il serait bon de tester le modèle T-NET en tant qu'outil de planification à part entière dans les approches opérationnelles des structures de gestion des projets de restauration. La nouvelle méthode de caractérisation devrait également être appliquée à des contextes géographiques et des largeurs de rivière plus importants, afin de tester sa robustesse et son applicabilité. Enfin, cette étude montre qu'il est possible de prédire plus efficacement les impacts du changement climatique sur les températures des rivières, en combinant les outils de modélisation et les connaissances de terrain. En utilisant ces deux approches, les futures décisions de gestion pourraient devenir plus pertinentes et plus efficaces.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les syndicats de bassin versant de la CLE et du SMAELT, tant pour leur soutien dans la mise à disposition des sites d'étude que pour les visites de terrain et la présentation de leurs actions de restauration. Je remercie le SAGE et le Département de la Loire pour leur contribution, notamment pour l'accès et la mise à disposition des données, ainsi qu'Amélie Potignon pour son engagement dans le projet, son suivi et son soutien tout au long de mon stage. Je remercie également mes collègues du projet cluster pour leur soutien sur le terrain. Enfin, mes remerciements vont à mon superviseur Laurent Valette, ainsi qu'à Florentina Moatar, pour leur encadrement, leurs conseils et leur disponibilité.

RÉFÉRENCES

- 1 Beaufort, A., Curie, F., Moatar, F., Ducharne, A., Melin, E., & Thiery, D. (2016). T-NET, a dynamic model for simulating daily stream temperature at the regional scale based on a network topology. *Hydrological Processes*, 30(13), 2196-2210. <https://doi.org/10.1002/hyp.10787>
- 2 Beaufort, A., Moatar, F., Sauquet, E., & Magand, C. (2020). *Thermie en rivière : Analyse géostatistique et description de régime : Application à l'échelle de la France*. 63 pages + 53 pages d'annexes.
- 3 Bowler, D. E., Mant, R., Orr, H., Hannah, D. M., & Pullin, A. S. (2012). What are the effects of wooded riparian zones on stream temperature? *Environmental Evidence*, 1(1), 3. <https://doi.org/10.1186/2047-2382-1-3>
- 4 Caissie, D. (2006). The thermal regime of rivers : A review. *Freshwater Biology*, 51(8), 1389-1406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>
- 5 Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Péan, C. (2023). *IPCC, 2023 : Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (First)*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- 6 Dan Moore, R., Spittlehouse, D. L., & Story, A. (2005). Riparian Microclimate and Stream Temperature Response to Forest Harvesting : A Review. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41(4), 813-834. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03772.x>
- 7 Daufresne, M., Roger, M. C., Capra, H., & Lamouroux, N. (2004). Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhône River : Effects of climatic factors. *Global Change Biology*, 10(1), 124-140. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2003.00720.x>
- 8 Dewalle, D. (2008). Guidelines for Riparian Vegetative Shade Restoration Based Upon a Theoretical Shaded-Stream Model 1. *Journal of The American Water Resources Association - J AM WATER RESOUR ASSOC*, 44, 1373-1387. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00230.x>
- 9 Diamond, J., Pinay, G., Bernal, S., Cohen, M., Lewis, D., Lupon, A., Zarnetske, J., & Moatar, F. (2022). Light and hydrologic connectivity drive dissolved oxygen synchrony in stream networks. *Limnology and Oceanography*, 68(2), 322. <https://doi.org/10.1002/lno.12271>
- 10 Dugdale, S. J. (2016). A practitioner's guide to thermal infrared remote sensing of rivers and streams : Recent advances, precautions and considerations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/wat2.1135>

- 11 Garner, G., Malcolm, I. A., Sadler, J. P., & Hannah, D. M. (2017). The role of riparian vegetation density, channel orientation and water velocity in determining river temperature dynamics. *Journal of Hydrology*, 553, 471-485. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.024>
- 12 Gutiérrez, Jones, R., Narisma, G., Alves, L., Amjad, M., Gorodetskaya, I., Grose, M., Klutse, N., Krakovska, S., Martínez-Castro, D., Li, J., Mearns, L., Mernild, S., Ngo-Duc, T., van den Hurk, B., & Yoon, J.-H. (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1^{re} éd.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- 13 Hebert, C., Caissie, D., Satish, M. G., & El-Jabi, N. (2011). Study of stream temperature dynamics and corresponding heat fluxes within Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada). *Hydrological Processes*, 25(15), 2439-2455. <https://doi.org/10.1002/hyp.8021>
- 14 Hutchison, B. A., & Matt, D. R. (1977). The Distribution of Solar Radiation within a Deciduous Forest. *Ecological Monographs*, 47(2), 185-207. <https://doi.org/10.2307/1942616>
- 15 Johnson, M. F., Albertson, L. K., Algar, A. C., Dugdale, S. J., Edwards, P., England, J., Gibbins, C., Kazama, S., Komori, D., Maccoll, A., Scholl, E. A., Wilby, R., Roque, F. de O., & Wood, P. F. (2024). Rising water temperature in rivers : Ecological impacts and future resilience. *WIREs Water*, 11(4). <https://doi.org/10.1002/wat2.1724>
- 16 Kalny, G., Laaha, G., Melcher, A., Trimmel, H., Weihs, P., & Rauch, H. P. (2017). The influence of riparian vegetation shading on water temperature during low flow conditions in a medium sized river. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, 418, Article 418. <https://doi.org/10.1051/kmae/2016037>
- 17 Kaushal, S. S., Likens, G. E., Jaworski, N. A., Pace, M. L., Sides, A. M., Seekell, D., Belt, K. T., Secor, D. H., & Wingate, R. L. (2010). Rising stream and river temperatures in the United States. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(9), 461-466. <https://doi.org/10.1890/090037>
- 18 Khalanski, M., Carrel, G., Desaint, B., Frugé, J.-F., Olivier, J.-M., Poirel, A., & Souchon, Y. (2008). Étude thermique globale du Rhône—Impacts hydrobiologiques des échauffements cumulés. *Hydroécologie Appliquée*, 16, 53-108. <https://doi.org/10.1051/hydro/2009005>
- 19 Konarska, J., Lindberg, F., Larsson, A., Thorsson, S., & Holmer, B. (2013). Transmissivity of solar radiation through crowns of single urban trees—Application for outdoor thermal comfort modelling. *Theoretical And Applied Climatology*, 117, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1000-3>
- 20 Langan, S. J., Johnston, L., Donaghy, M. J., Youngson, A. F., Hay, D. W., & Soulsby, C. (2001). Variation in river water temperatures in an upland stream over a 30-year period. *Science of The Total Environment*, 265(1), 195-207. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00659-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00659-8)
- 21 Li, G., Jackson, C. R., & Krasinski, K. A. (2012). Modeled riparian stream shading : Agreement with field measurements and sensitivity to riparian conditions. *Journal of Hydrology*, 428-429, 142-151. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.032>
- 22 Lintunen, A., Kaitaniemi, P., Perttunen, J., & Sievänen, R. (2013). Analysing species-specific light transmission and related crown characteristics of *Pinus sylvestris* and *Betula pendula* using a shoot-level 3D model. *Canadian Journal of Forest Research*, 43(10), 929-938. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0178>
- 23 Lynch, J. A., Rishel, G. B., & Corbett, E. S. (1984). Thermal alteration of streams draining clearcut watersheds : Quantification and biological implications. *Hydrobiologia*, 111(3), 161-169. <https://doi.org/10.1007/BF00007195>
- 24 Moatar, F., Diamond, J., Chaumot, A., Recoura-Massaquant, R., Bonineau, C., Pesce, S., & Pinay, G. (2022). *Détermination du risque d'hypoxie des cours d'eau de tête de réseau hydrographique dans un contexte de changement climatique*. (p. 60 pages + annexes) [Rapport de recherche INRAE].
- 25 Moatar, F., & Dupont, N. (2016). *La Loire fluviale et estuarienne : Un milieu en évolution*. Editions Quae.

- 26 Morel, M., Booker, D. J., Gob, F., & Lamouroux, N. (2020). Intercontinental predictions of river hydraulic geometry from catchment physical characteristics. *Journal of Hydrology*, 582, 124292. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124292>
- 27 Poiriel, A., Lauters, F., & Desaint, B. (2008). 1977-2006 : Trentes années de mesures des températures de l'eau dans le Bassin du Rhône. *Hydroécologie Appliquée*, 16, 191-213. <https://doi.org/10.1051/hydro/2009002>
- 28 Rognant, N., Bacchetta, J., & Juillard, L. (2013). Comparaison des méthodes d'estimation d'un paramètre quantitatif : Évaluation de la concordance. *Néphrologie & Thérapeutique*, 9(2), 92-97. <https://doi.org/10.1016/j.nephro.2012.09.007>
- 29 Rutherford, J., Blackett, S., Blackett, C., Saito, L., & Davies-Colley, R. (1997). Predicting the Effects of Shade on Water Temperature in Small Streams. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 31, 707-721. <https://doi.org/10.1080/00288330.1997.9516801>
- 30 Ryan, D., Yearsley, J., & Kelly-Quinn, M. (2013). Quantifying the effect of semi-natural riparian cover on stream temperatures : Implications for salmonid habitat management. *Fisheries Management and Ecology*, 20. <https://doi.org/10.1111/fme.12038>
- 31 Seyedhashemi, H., Moatar, F., Vidal, J.-P., & Thiéry, D. (2023). Past and future discharge and stream temperature at high spatial resolution in a large European basin (Loire basin, France). *Earth System Science Data*, 15(7), 2827-2839. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2827-2023>
- 32 Seyedhashemi, H., Vidal, J.-P., Diamond, J. S., Thiéry, D., Monteil, C., Hendrickx, F., Maire, A., & Moatar, F. (2022). Regional, multi-decadal analysis on the Loire River basin reveals that stream temperature increases faster than air temperature. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(9), 2583-2603. <https://doi.org/10.5194/hess-26-2583-2022>
- 33 Singh, R., Tiwari, A., & Singh, G. (2021). Managing riparian zones for river health improvement : An integrated approach. *Landscape and Ecological Engineering*, 17, 3. <https://doi.org/10.1007/s11355-020-00436-5>
- 34 Sinokrot, B. A., & Stefan, H. G. (1993). Stream temperature dynamics : Measurements and modeling. *Water Resources Research*, 29(7), 2299-2312. <https://doi.org/10.1029/93WR00540>
- 35 Soubeyroux, J.-M., Bernus, S., Corre, L., Drouin, A., Dubuisson, B., Etchevers, P., Gouget, V., Josse, P., Kerdoncuff, M., Samacoits, R., & Tocque, F. (2020). *Les nouvelles projections climatiques de référence DRAIS 2020 pour la Métropole* [Rapport technique]. Météo France.
- 36 Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- 37 Thiéry, D., & Moutzopoulos, C. (1992). *Un modèle hydrologique spatialisé pour la simulation de très grands bassins : Le modèle EROS formé de grappes de modèles globaux élémentaires*. 285. <https://brgm.hal.science/hal-01061971>
- 38 Vidal, J., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., & Soubeyroux, J. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627-1644. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>
- 39 Webb, B. W., & Zhang, Y. (1997). Spatial and Seasonal Variability in the Components of the River Heat Budget. *Hydrological Processes*, 11(1), 79-101. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199701\)11:1<79::AID-HYP404>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199701)11:1<79::AID-HYP404>3.0.CO;2-N)
- 40 Wilkerson, E., Hagan, J. M., Siegel, D., & Whitman, A. A. (2006). The Effectiveness of Different Buffer Widths for Protecting Headwater Stream Temperature in Maine. *Forest Science*, 52(3), 221-231. <https://doi.org/10.1093/forestscience/52.3.221>