



L'effet d'une chaîne d'étangs sur la température de l'eau, pour une discussion des impacts cumulatifs. Le cas du bassin de l'Oncre en Limousin (France)

Laurent Touchart, Pascal Bartout, Quentin Choffel, Francesco Donati, Simon Cailliez, Pascal Trintignac

DANS **NOROIS** 2023/1 (N° 266), PAGES 27 À 45

ÉDITIONS **PRESSES UNIVERSITAIRES DE RENNES**

ISSN 0029-182X

ISBN 9782753594982

Article disponible en ligne à l'adresse

<https://www.cairn.info/revue-norois-2023-1-page-27.htm>



CAIRN.INFO
MATIÈRES À RÉFLEXION

Découvrir le sommaire de ce numéro, suivre la revue par email, s'abonner...

Flashez ce QR Code pour accéder à la page de ce numéro sur Cairn.info.



Distribution électronique Cairn.info pour Presses universitaires de Rennes.

La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.



Norois

Environnement, aménagement, société

266 | 2023

Varia

L'effet d'une chaîne d'étangs sur la température de l'eau, pour une discussion des impacts cumulatifs. Le cas du bassin de l'Oncre en Limousin (France)

Laurent Touchart, Pascal Bartout, Quentin Choffel, Francesco Donati, Simon Cailliez et Pascal Trintignac



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/norois/13080>

DOI : 10.4000/norois.13080

ISSN : 1760-8546

Éditeur

Presses universitaires de Rennes

Édition imprimée

Date de publication : 20 juin 2023

Pagination : 27-45

ISBN : 978-2-7535-9498-2

ISSN : 0029-182X

Distribution électronique Cairn



CAIRN.INFO
MATIÈRES À RÉFLEXION

Référence électronique

Laurent Touchart, Pascal Bartout, Quentin Choffel, Francesco Donati, Simon Cailliez et Pascal Trintignac, « L'effet d'une chaîne d'étangs sur la température de l'eau, pour une discussion des impacts cumulatifs. Le cas du bassin de l'Oncre en Limousin (France) », *Norois* [En ligne], 266 | 2023, mis en ligne le 01 janvier 2026, consulté le 06 juillet 2023. URL : <http://journals.openedition.org/norois/13080> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/norois.13080>



Creative Commons - Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International - CC BY-NC-ND 4.0

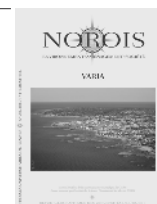
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



www.pur-editions.fr



Revue en ligne : <https://journals.openedition.org/norois/>



L'effet d'une chaîne d'étangs sur la température de l'eau, pour une discussion des impacts cumulatifs. Le cas du bassin de l'Oncre en Limousin (France)

The effect of a cascade of ponds on water temperature: a cumulative impact assessment of the Oncre basin in Western France

Laurent TOUCHART^{a*}, Pascal BARTOUT^a, Quentin CHOFFEL^b, Francesco DONATI^b, Simon CAILLIEZ^a et Pascal TRINTIGNAC^c

^a Laboratoire Cedete, 10 rue de Tours, Université d'Orléans, 45065 Orléans Cedex 2 (laurent.touchart@univ-orleans.fr) (pascal.bartout@univ-orleans.fr) (simon.cailliez@etu.univ-orleans.fr)

^b BE Ecolimneau, 8 Rue René Coty, 85000 La Roche-sur-Yon (qchoffel@ecolimneau.fr) (fdonati@ecolimneau.fr)

^c Conseiller aquacole, Syndicat Mixte pour le Développement de l'Aquaculture et de la Pêche en Pays de la Loire, 3 Rue Célestin Freinet, 44200 Nantes (pascal.trintignac@smidap.fr)

* Auteur correspondant

Résumé : Dans le contexte des travaux menés quant à l'impact cumulé des retenues d'eau sur les milieux aquatiques, cette recherche a pour objectif de mesurer l'effet d'une grande chaîne d'étangs sur la température d'un petit cours d'eau du Centre-ouest de la France, l'Oncre. À petite échelle cartographique, l'Oncre à son embouchure a la même température moyenne estivale que les deux autres rivières voisines. À moyenne échelle, le rétablissement des caractères fluviaux à l'aval du dernier étang de la chaîne s'effectue en environ 1,5 km. À grande échelle cartographique, la température entre chaque étang de la chaîne dépend surtout de la situation ensoleillée ou ombrée de son déversoir. L'article conclut à un fonctionnement autonome de chaque étang de la chaîne plutôt qu'à un effet cumulatif.

Abstract: In the French context of the studies about the cumulative impact of reservoirs on the aquatic environment, this research aims to measure with recording thermometers the effect of a cascade of small water bodies (rural ponds) on the water temperature of a small stream (the Oncre River) located in Western France. The results on a small map scale show that the Oncre River and the two comparable small streams at the confluence present the same mean temperature in summer. On a medium scale, the restoration of fluvial characteristics downstream of the last pond in the cascade takes about 1.5 km. On a large map scale, water temperature between each pond of the cascade depends above all on the sunny or shaded situation of its outlet (weir). The paper concludes with an autonomous heat budget of each pond in the cascade rather than a cumulative effect.

Mots clés : limnologie, étang, impact environnemental, réseau hydrographique, hydrosystème, aménagement fluvial

Keywords: limnology, pond, environmental impact, hydrographic network, hydrosystem, hydraulic engineering



INTRODUCTION

L'intérêt scientifique international pour un éventuel cumul de l'effet de plusieurs plans d'eau proches les uns des autres (par rapport à l'influence d'un seul, isolé) sur les qualités d'un cours d'eau est ancien, du moins pour les grands lacs de barrage (Litvinov et Roščupko, 1992, Avakian, 1998, Barbosa *et al.*, 1999). Quelques études envisagent leur effet intégré, sur l'environnement régional (Avakian, 1998) ou la connectivité (Barbosa *et al.*, 1999, Boutault, 2020). Mais la plupart des recherches se spécialisent dans le suivi d'un compartiment séparé, que ce soient les organismes biologiques (Moura *et al.*, 2013, Lu *et al.*, 2020), les sédiments (Zhang *et al.*, 2022) ou la température de l'eau (Litvinov et Roščupko, 1992, Wang *et al.*, 2020). L'attention portée aux effets des étangs, des petites retenues, voire des seuils au fil de l'eau, a longtemps été plus rare, mais elle se développe depuis une quinzaine d'années dans les pays anglo-saxons (Maxted *et al.*, 2005, Santucci *et al.*, 2005, Maheu *et al.*, 2016, Zaidel *et al.*, 2021).

En France, cette question scientifique a été récemment institutionnalisée, à partir du moment où, dans le décret du 29 décembre 2011 « portant réforme des études d'impact des projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements », l'Etat imposait que, pour toute nouvelle création de retenue d'eau, les effets cumulés du projet avec ceux des plans d'eau déjà existants fussent désormais analysés. Dans ce cadre, le Ministère de l'Environnement commanda à l'IRSTEA, en 2014, un état des lieux des connaissances sur la question, désormais désignée sous l'appellation d'ICRA (Impact Cumulé des Retenues d'eau sur les milieux Aquatiques), qui donna naissance à un rapport (Carluer *et al.*, 2016, pour la version courte). Dans la version longue de ce rapport, les températures de l'eau étaient abordées dans le chapitre coordonné par Grimaldi (2016), s'appuyant sur la thèse de doctorat néo-zélandaise de Thomson (2012) pour les mesures de terrain et sur un rapport de l'ONG américaine International Rivers (Bergkamp *et al.*, 2000), pour la réflexion conceptuelle. Dans cette même version longue, le compartiment hydrologique (débits) était coordonné par Molénat et Habets (2016), ce chapitre ayant été ensuite prolongé par un article scientifique de synthèse bibliographique (Habets *et al.*, 2018), dans

lequel il était indiqué que les impacts cumulatifs sont difficiles à mesurer sur le terrain, si bien qu'ils sont le plus souvent modélisés. L'expertise de 2016 fut complétée d'une méthodologie mise au point par l'AFB (Bellot *et al.*, 2017), qui a conduit au lancement, par ce même organisme, du programme de « Retour d'expérience sur l'évaluation de l'impact cumulé des retenues ». Ce programme, en cours depuis 2019 pour un rendu prévu en octobre 2022, s'appuie sur huit bassins-tests, dont ceux de la haute Dronne (dans le PNR Périgord-Limousin), de la Sauer (dans le PNR des Vosges du nord) et de la Sarthe aval (le seul qui soit à l'échelle d'un SAGE), la plupart des auteurs du présent article participant, en lien avec l'OFB, à ce projet sur la Sauer et l'un d'entre eux sur la Sarthe aval.

Bien que l'intérêt des autorités françaises pour l'effet des grands barrages soit confirmé (Richard *et al.*, 2022), la principale originalité de l'ICRA par rapport à la littérature scientifique internationale réside sans doute dans l'attention portée aux petites retenues d'eau et aux étangs. Il est préconisé par la bibliographie de l'ICRA de prendre en compte la complexité et la diversité des petits plans d'eau, de leur situation et de leurs effets, notamment la distance d'influence (ou « de retour », Bellot *et al.*, 2017), le type de connectivité entre les retenues, les impacts possiblement additifs ou infra-additifs (Carluer *et al.*, 2016, à la suite de LaGory *et al.*, 1989). Dans la pratique, cependant, certaines études intermédiaires du programme de l'ICRA cèdent à la facilité de simplement multiplier l'impact par le nombre de plans d'eau du bassin (Cavalier-Lebrun, 2020)¹, comme si le problème se résumait à la quantité d'étangs.

Étant donné que l'impact cumulé d'une succession de petits barrages est difficile à estimer, au point que Santucci *et al.* (2005) écrivent « *we found little evidence of cumulative effects of dams* », l'enjeu du présent article se trouve être celui d'une meilleure connaissance du fonctionnement d'une chaîne d'étangs par le suivi approfondi de la température de l'eau. On sait depuis longtemps que la température est l'un des paramètres majeurs de suivi de la qualité physico-chimique des réseaux hydrogra-

1. « Le choix a été fait de toujours utiliser l'indicateur 'densité de retenues sur le SBV', quel que soit l'impact analysé. En effet, il s'agit d'un critère global rendant compte de l'importance de l'implantation de retenues sur un territoire. » (Cavalier-Lebrun, 2020, p. 28).

phiques anthropisés, du fait des grandes distances sur lesquelles ses perturbations peuvent être suivies (Williams 1968), de son rôle dans la zonation écologique des cours d'eau (Verneaux, 1973) et de son importance pour la physiologie des organismes aquatiques (Brooker, 1981). Plus récemment, la température s'est retrouvée au centre de polémiques plus larges concernant les modalités de restauration de la continuité écologique des cours d'eau (Bravard et Lévêque, 2020) et les réponses possibles à apporter pour lutter contre l'assèchement du petit réseau hydrographique de tête de bassin.

Situé en Limousin, drainé vers la Loire via la Glane et la Vienne, le terrain de l'Oncre a été choisi en dehors des bassins-tests du programme de l'ICRA, pour profiter d'une part de l'ancienneté des mesures de températures de l'eau dans le bassin de la Glane et ses étangs, commencées en 1998 (Touchart, 1999), d'autre part de l'intérêt de l'une des plus grandes chaînes d'étangs de la région. Dans la méthodologie ICRA, qui suit une logique prospective, il est proposé de réaliser les études à deux échelles, celle du bassin versant et celle de la retenue d'eau dont la construction est projetée (Bellot *et al.*, 2017). L'objectif n'étant pas ici de créer un nouveau plan d'eau mais d'opérer, dans une logique d'état des lieux, une étude géographique d'étangs existant depuis longtemps, nous avons choisi de fonder toute la démarche sur les changements d'échelles, d'une part en emboîtant les sous-bassins, d'autre part en prenant des mesures entre chaque étang de la chaîne. Cela répond en outre au regret souvent exprimé par les auteurs anglo-saxons, selon lesquels les échelles spatiotemporelles ne sont pas assez prises en compte dans les études concrètes d'évaluation environnementale stratégique (João, 2007), notamment celles d'impact cumulé (Therivel et Ross, 2007) et plus particulièrement celles des effets cumulatifs dans les hydrosystèmes (Seitz *et al.*, 2011). Le but n'est donc pas ici de reconstituer une température naturelle initiale, mais de focaliser le travail sur la distance d'impact à plusieurs échelles.

Appuyée d'une part sur les travaux anciens de Touchart (1999, 2001) indiquant que, dans une petite chaîne de deux étangs du bassin de la Glane, c'était le premier qui provoquait la quasi-totalité du réchauffement, d'autre part sur l'une des possibilités théoriques selon laquelle l'impact peut dans

certains cas être « infra-additif » (LaGory *et al.*, 1989), c'est-à-dire que « l'effet cumulé est moindre que la somme des effets » (Carluier *et al.*, 2016, p. 16), l'hypothèse de travail que nous posons ici se trouve être qu'une grande chaîne d'étangs ne modifie pas tellement plus la température qu'un seul grand étang isolé. En effet, dans le bilan thermique des étangs (Touchart, 2016), la partie climatique, dominée par la radiation sur l'étang, est beaucoup plus forte que la partie hydrologique, c'est-à-dire l'apport calorifique du ruisseau. Mais cette hypothèse est-elle vérifiée pour une grande chaîne de plusieurs dizaines d'étangs ? Et, si oui, si la valeur du réchauffement n'est pas vraiment plus forte qu'en aval d'un ou deux étangs, la distance de propagation sur l'émissaire fluvial n'est-elle pas, elle, allongée ?

Ces questions fondamentales s'accompagnent de problèmes appliqués. Les aménagements susceptibles d'aider à diminuer l'effet thermique d'une chaîne sont-ils les mêmes (construction d'un moine et d'une dérivation) que ceux préconisés pour un grand étang isolé ? Dans le cas d'une politique d'effacement d'étang, lequel choisir de préférence à l'intérieur d'une succession de barrages ?

LE SITE D'ÉTUDE : L'ONCRE, UN SOUS-BASSIN DE LA GLANE RICHE EN ÉTANGS

Au nord-ouest de Limoges, les plateaux cristallins du Haut Limousin sont drainés par un affluent de rive droite de la Vienne d'une quarantaine de kilomètres de longueur, la Glane², dont le bassin³ s'étend sur 311 km² (Diren Limousin, 2008) pour un module brut d'environ⁴ 4 m³/s. Son régime pluvio-évaporal océanique, qui fait alterner des hautes eaux de décembre à mai et des basses eaux de juin à novembre, a été étudié par Touchart (2003). Le bassin de la Glane compte 1195 plans d'eau couvrant 507 ha (limnité étendue de 1,63 %), dont 703 étangs couvrant 490 ha (stagnucité⁵ de 1,58 %)

2. Le tronç principal de la Glane, sous le code Sandre L08-0300, a une longueur de 41 km.

3. Le bassin de la Glane correspond administrativement à la « masse d'eau » de code européen FRGR0382 « la Glane et ses affluents depuis sa source jusqu'à la confluence avec la Vienne ».

4. La station hydrométrique du Dérot (code L0813010) mesure les débits d'un bassin de 288 km². À cet endroit, le module brut est de 3,96 m³/s pour la normale 1967-1996, soit 4,28 m³/s estimés pour 311 km².

5. La limnité étendue est la part en eau stagnante d'un territoire tous plans d'eau confondus, la stagnucité est la part en eau d'étang d'un territoire.



et 492 mares couvrant 17 ha (croisement inédit de BD Topo, Ecrins_15 et OpenStreetMap⁶).

L'Oncre parmi les grands affluents de la Glane

Parmi les trois plus grands affluents de la Glane que sont la Vergogne, le Glanet et l'Oncre, celui-ci est proportionnellement le plus riche en petits plans d'eau (tableau 1). Le Syndicat d'aménagement du bassin de la Vienne (SABV, 2014) avait recensé 81 étangs sur les 26,46 km² de son bassin. Cela représente une densité de plus du double de celle de l'ensemble du bassin de la Glane. Quant à la stagnation, nous la calculons en 2020 à 2,2 %. À ces indicateurs, il faut ajouter que le haut bassin de l'Oncre possède la deuxième plus grande chaîne, en nombre d'étangs, de tout le Limousin (Bartout, 2006).

Si l'Oncre devait être comparé aux deux autres grands affluents de la Glane, on pourrait dire qu'il est représentatif d'un cours d'eau influencé par une longue chaîne d'étangs se succédant en escalier, cependant que la Vergogne est significative d'un cours d'eau influencé par un très grand étang, celui de Cieux, le plus vaste du département de la Haute-Vienne, barrant le tronc principal, tandis que le Glanet est peu impacté par les plans d'eau.

La chaîne d'étangs dans le bassin de l'Oncre

De sa source à son confluent dans la Glane, le tronc principal de l'Oncre (code Sandre L0815500) court sur 12,18 km. Si l'on applique une règle de proportionnalité aux débits mesurés à la station du Dérot, le module brut de l'Oncre à son embouchure est d'environ 350 l/s, les deux moyennes mensuelles extrêmes étant de 250 l/s en août et 730 l/s en février.

6. La base Ecrins_15 de l'Agence Européenne pour l'Environnement identifie les principaux plans d'eau à l'échelle de l'Europe géographique via son champ Ecr_Lak. La base BD Topo de l'IGN permet d'identifier les objets en eau (cours d'eau mais aussi plans d'eau) à l'échelle de la France sans que la distinction entre les deux soit optimale, mais elle permet de cartographier des plans d'eau de petite à très petite taille. OpenStreetMap est une base OpenSource où ce sont les contributeurs qui identifient tous les objets présents d'un territoire. Les très petites mares y sont souvent bien repérées grâce à une connaissance fine du terrain, complétant de facto l'approche des deux premières bases de données fondées sur des supports aéroportés. Le croisement a consisté à éliminer les artefacts de chaque base, puis à compiler les inventaires : si les plans d'eau se trouvent être présents sur 2 ou 3 bases, leur présence est certifiée, s'ils ne sont que sur l'une des trois bases, alors le choix a été de privilégier BD Topo pour les étangs et OpenStreetMap pour les mares.

Si l'on confronte la topographie IGN avec les affleurements géologiques du BRGM, on constate que le bassin de l'Oncre, qui culmine à 492 m d'altitude, voit sa partie supérieure taillée dans le leucogranite très dur des monts de Blond. C'est juste en dessous de cette partie « montagnarde », dont la limite est bien marquée dans le paysage par le talus de Boscartus, que s'épanouit, dans le granite porphyroïde à biotite, moins résistant, la grande chaîne d'étangs. Ce granite, dit « de Fromental », a été favorable à l'installation d'étangs, par la succession d'alvéoles et de cloisons le modelant. Les confluent entre les ruisseaux se rejoignent dans les principaux alvéoles, dont une bonne part a été ennoyée par la construction d'étangs, notamment ceux de Fromental et du Brudou(x). En aval de ce dernier, les alvéoles, où les rus de la Goutte et de Ceinturat confluent avec l'Oncre, sont libres d'étangs et voient leurs fonds occupés de prairies humides. Cette moitié nord du bassin de l'Oncre, très riche en étangs, est limitée au sud par les mylonites et les filons de quartz de la faille d'Oradour traversant l'étang du Pic. Plus au sud, dans les affleurements métamorphiques de Javerdat, quelques plans d'eau isolés occupent les dernières dépressions. Enfin, tout le cours aval est exempt d'étang dans le granite à deux micas d'Oradour. Le confluent dans la Glane est à 228 m d'altitude.

Dans le cadre d'une réflexion sur l'impact cumulé, la focale doit se faire sur le grand nombre d'étangs situés dans le granite de Fromental. Or cette concentration s'effectue sous forme de plusieurs chaînes confluant vers la principale qui barre le cours même de l'Oncre. Ce sont au total 55 étangs qui se succèdent en plusieurs branches, dont 13 sur le cours principal de l'Oncre, pour aboutir aux deux derniers, ceux de Fromental et du Brudou, lesquels sont reliés par un peu plus de 300 m de linéaire fluvial. En revanche, dans toute la partie centrale, la chaîne forme un escalier parfait : il n'y a pas le moindre mètre d'eau courante. La chaussée de l'étang précédent domine directement la queue de l'étang suivant. Ce sont ces 5 étangs, tous à déversoir de surface, qui ont été prioritairement suivis (figure 1).

D'amont en aval, les superficies et les hauteurs de chaussée sont de 0,48 ha et 2,2 m pour l'étang à moine de Boscartus, 0,93 ha et 1,5 m pour les étangs Jumeaux (séparés par une digue longitudi-



nale), dont 0,24 ha pour la partie ouest, la seule suivie, 3 ha et 3,5 m pour l'étang de la Cascade, 2 ha et 2 m pour celui Trois Îles, 17,5 ha et 4,5 m pour celui de Fromental et 2,5 ha et 2,5 m pour celui du Brudou. La bathymétrie exacte est connue seulement pour celui du Brudou, qui, très envasé, ne renferme selon le CREN (2011) qu'un volume de 25 400 m³ (tableau 2).

Tous ces étangs sont privés et la grande majorité d'entre eux sont gérés pour la pêche familiale, la détente et le repos. Seul le tout dernier, celui du Brudou, a été confié par ses propriétaires au Conservatoire des espaces naturels du Limousin par un bail emphytéotique de 99 ans (CREN, 2011). Avec celui de Fromental, juste en amont, il fait partie d'une ZNIEFF de type 1. Face à la sécheresse accentuée de l'été 2022, le niveau de l'étang du Brudou a été baissé par un soutirage de fond, afin de soutenir l'étiage de l'Oncre.

MÉTHODE DE SUIVI DE LA TEMPÉRATURE DE L'EAU

Cette étude croise des mesures automatiques en continu et des mesures manuelles ponctuelles. Les

premières sont effectuées au moyen de thermomètres enregistreurs *HoboWater Temperature Pro V2* dont la précision donnée par le constructeur est de deux dixièmes de degré entre 0 °C et 50 °C, cependant que notre calibrage avec un thermomètre de haute précision leur attribue une précision de six centièmes de degré. C'est ce dernier thermomètre, un *Lufft C100* à résistance de platine en montage quatre fils, dont la précision, garantie par un certificat du service de métrologie d'*Avantec*, est au centième de degré, qui a été aussi utilisé pour la prise manuelle des températures.

Les thermomètres automatiques enregistrent une donnée toutes les heures. Les prises manuelles sont réalisées l'après-midi, une fois par semaine en été et toutes les trois semaines aux autres saisons. Comme il faut environ une heure pour effectuer le périple entre les sites, l'ordre fait alterner un trajet d'amont en aval, puis d'aval en amont la fois suivante, puis du milieu (en allant d'abord du milieu vers l'amont puis du milieu vers l'aval), cette troisième solution prenant environ une heure et demi. On peut ainsi estimer que, si on calcule les moyennes sur un an, les biais se compensent. Les thermomètres automatiques permettent d'approcher la marge d'erreur

	Vergogne	Glanet	Oncre	Données
Surface du bassin versant	43,31 km ²	29,90 km ²	26,46 km ²	SABV (2014)
Surface en eau d'étang	78,5 ha	3,1 ha	57 ha	inédites
Stagnucité	1,8 %	0,1 %	2,2 %	inédites
Nombre d'étangs	99	62	81	SABV (2014)
Densité d'étangs par linéaire de cours d'eau et par superficie du bassin	0,39 étang/km 2,3 étangs/km ²	0,31 étang/km 2,1 étangs/km ²	0,41 étang/km 3,1 étangs/km ²	inédites

Tableau 1 : Les caractéristiques stagnustres des trois plus grands sous-bassins de la Glane
The characteristics of the ponds of the three largest sub-basins of the River Glane

Nom de l'étang	Superficie	Profondeur max	Type de sortie	Ombrage sortie
Boscarts	0,48 ha	2,2 m	Moine	Permanent
Jumeau	0,24 ha	1,5 m	Déversoir	Permanent
Cascade	3 ha	3,5 m	Déversoir	Matin
Trois îles	2 ha	2 m	Déversoir	Jamais
Fromental	17,5 ha	4,5 m	Déversoir	Soir
Brudou	2,5 ha	2,5 m	Déversoir/mixte	Jamais

Tableau 2 : Les caractéristiques des six étangs étudiés
Characteristics of the six ponds

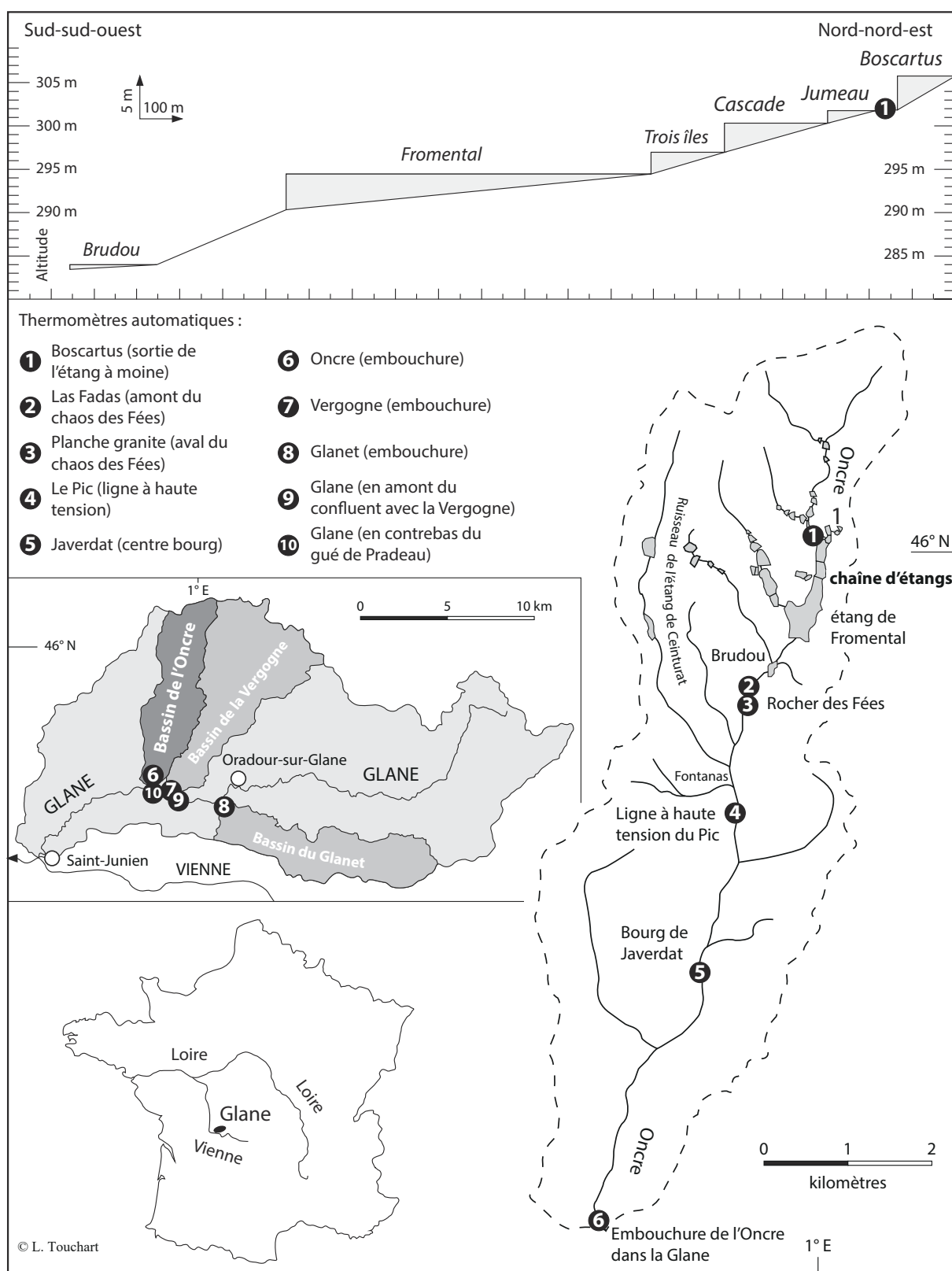


Figure 1 : Coupe des étangs étudiés et carte de localisation des thermomètres automatiques
 Topographic section of the ponds and location map of recording thermometers



initiale, qu'on cherche à minimiser par la rotation des trois trajets. Ainsi, la variation moyenne d'une heure à l'autre a été de 0,14 °C du 2 au 27 juillet 2021 à la sortie de l'étang à moine de Boscartus et de 0,28 °C du 20 août au 6 septembre 2021 à l'embouchure de l'Oncre.

Les thermomètres automatiques ont été placés en 9 sites pendant l'été 2021, dont 6 dans le cours principal de l'Oncre. Le point le plus en amont se trouve à la sortie de l'étang à moine qui précède l'escalier d'étangs à déversoir aboutissant dans celui de Fromental. En effet, étant donné que plusieurs dizaines de petits étangs en chaînes barrent toutes les branches fluviales de l'Oncre supérieur, y compris sur source, nous postulons que l'eau de référence sera celle soutirée au fond de l'étang de Boscartus, là où commence l'escalier des plus grands étangs du cours principal. Le 2^e point de mesure automatique se trouve à 345 m en aval du déversoir de l'étang du Brudou. La comparaison entre les deux premiers thermomètres sera considérée comme celle de l'effet de la chaîne des 5 étangs à déversoir. Les 4 thermomètres suivants permettent de suivre le rétablissement des qualités fluviales de l'Oncre sur un peu plus de 8 km jusqu'à l'embouchure. Les 3 autres thermomètres automatiques ont été placés, l'un à l'embouchure de la Vergogne, les deux autres dans la Glane, à des fins de comparaison. En été 2022, un site a été ajouté à l'embouchure du Glanet, permettant ainsi de comparer les trois plus grands affluents de la Glane. Les deux étés de mesures ont

été très différents sur le plan climatique, celui de 2021 ayant été frais et humide, celui de 2022 chaud et, surtout, très sec.

Les mesures manuelles ont été prises en 11 sites, dont 9 dans le cours principal de l'Oncre et 2 sur de petits ruisseaux affluents. Les plus importantes pour l'étude sont les 5 prises de mesures au déversoir même de chaque étang formant la chaîne principale. Les 4 autres forment des intermédiaires entre les thermomètres automatiques répartis sur le linéaire des 8 km de la partie aval Oncre.

Le nombre de mesures des thermomètres automatiques a été de 11 272 pour l'été 2021 et de 4 395 pour l'été 2022. D'avril à décembre 2021, les mesures manuelles ont été prises à 25 dates différentes, fournissant 241 données. De janvier à juillet 2022, elles l'ont été à 18 dates, procurant 170 données. Le nombre total de mesures de températures de l'eau ayant servi à l'écriture de cet article est donc de 16 078 (15 667 automatiques et 411 manuelles). Étant donné que le placement de certains thermomètres automatiques réclame plusieurs heures d'aller et retour en cuissardes-échassiers et qu'ils ont tous été déposés et relevés par le seul premier auteur, les contraintes d'emploi du temps de celui-ci ont provoqué des décalages dans leur période de marche, sans compter les trous de données dus à la perte de deux d'entre eux et au fonctionnement d'un troisième flottant sur l'eau lors du lâchage de l'une des deux fixations (tableau 3). Pour traiter les données sur les plages horaires les plus larges possibles,

Nom du thermomètre	Première mesure 2021	Dernière mesure 2021	Première mesure 2022	Dernière mesure 2022	Nombre de mesures
Boscartus	02/07 à 11h	27/07 à 10h			600
Las Fadas	07/07 à 11h	23/09 à 11h	05/07 à 16h	24/08 à 17h	3075
Planche	02/07 à 12h	15/09 à 10h			1799
Le Pic LHT	26/07 à 11h	23/09 à 10h			1416
Javerdat	23/07 à 10h	06/10 à 15h			1806
Oncre embouchure	20/08 à 11h	06/09 à 10h	04/07 à 17h	21/07 à 9h	810
Vergogne	20/07 à 17h	06/09 à 9h	05/07 à 16h	24/07 à 9h	2339
Glanet			04/07 à 16h	21/07 à 10h	403
Glane-Vergogne	20/07 à 17h	06/09 à 9h	05/07 à 16h	24/08 à 9h	2339
Glane-Pradeau	23/07 à 11h	06/09 à 10h			1080

Tableau 3 : Les plages de mesures des thermomètres automatiques
Measurement ranges of recording thermometers

il était donc préférable de choisir des intersections différentes selon les échelles étudiées, en fonction du nombre de sites nécessaires à la comparaison.

Pour cadrer les mesures de température de l'eau, l'occupation des sols des bassins versants et le linéaire de ripisylve ont été quantifiés par télédétection pour les trois principaux affluents de la Glane. L'image S2A-MSIL2A-20220811T105631-N0400-R094-T31TCL-20220811T190256 du satellite Sentinel 2a du 11 août 2020 a d'abord été corrigée sur le logiciel ENVI 4.7 afin d'éviter les éventuelles erreurs radiométriques. Puis un stretching linéaire de 5 % a été appliqué. Les zones boisées ont été découpées sous QGIS 3.22.6 et, pour la ripisylve, une bande de 5 m de part et d'autre du cours d'eau, a été définie. Bien que la hauteur de la ripisylve n'ait pas pu être cartographiée dans ce travail, il est possible de dire que la largeur des chenaux est suffisamment faible pour que l'ombre portée par la ripisylve soit, quand elle existe, efficace sur l'ensemble du profil en travers, sauf à quelques endroits élargis du tronc principal de la Glane. Au confluent de l'Oncre et de la Glane, le premier fait 2 m de largeur et la seconde 7 m. Cependant, 350 m en amont, en arrière du gué de Pradeau, la Glane fait 16 m de large.

RÉSULTATS

À l'échelle du bassin de la Glane

Sur un linéaire de seulement 5 600 m, à une distance située entre 25 et 30 km de sa source, la Glane reçoit ses trois plus grands affluents, d'abord le Glanet en rive gauche, puis la Vergogne et l'Oncre en rive droite. Les mesures automatiques réalisées à ces trois confluent en 2022 et à deux d'entre eux en 2021 permettent une comparaison à petite échelle cartographique. En fin d'été 2021, frais et humide, la moyenne des 407 heures allant du 20 août à 11 h au 6 septembre à 9 h était la plus chaude dans l'Oncre, de 0,8 °C de plus que dans la Vergogne et de 0,3 °C de plus que dans la Glane en amont des deux confluent (figure 2). La dispersion est plus forte dans l'Oncre (écart-type de 1,59) que dans la Vergogne (1,25) et la Glane (1,29). On notera les maxima diurnes élevés dans l'Oncre et les minima diurnes élevés dans la Glane. L'Oncre se distingue par sa forte amplitude diurne, la Glane par le retard des minima et des maxima dans le cycle diurne

(figure 3). Sur les 16 jours complets allant du 21 août au 5 septembre 2021, l'amplitude diurne apériodique a été de 3,34 °C dans l'Oncre, 1,99 °C dans la Vergogne et 1,92 °C dans le tronc principal de la Glane en amont des deux confluent, l'amplitude diurne périodique ayant été respectivement de 3,30 °C, 1,90 °C et 1,84 °C.

En début d'été 2022, chaud et sec, l'Oncre est toujours l'affluent le plus chaud, et cette différence par rapport à la fin de l'2021 s'accroît avec la Vergogne, mais reste la même avec le cours principal de la Glane (tableau 4). En été 2022, l'amplitude diurne de l'Oncre est beaucoup plus forte qu'en 2021, alors que celle de la Vergogne et de la Glane ne le sont que légèrement plus. Le Glanet, ajouté en 2022, a un comportement thermique proche de celui de la Vergogne, tant en moyenne qu'en amplitude diurne, s'en distinguant néanmoins par une montée plus précoce vers les maxima dans le cycle diurne. En 2022, l'Oncre se distingue par une dispersion des données encore bien plus forte qu'en 2021 (écart-type de 2,70), alors que les valeurs restent à peu près les mêmes pour les autres cours d'eau.

À l'échelle de l'Oncre

Les cinq thermomètres automatiques placés sur les 8,3 km de linéaire courant entre le dernier étang de la chaîne⁷ et l'embouchure de l'Oncre dans la Glane permettent d'étudier le rétablissement fluvial. Ils sont complétés par un sixième thermomètre automatique en amont de la chaîne principale, qui n'a fonctionné qu'au début de la saison⁸, et par des prises de températures ponctuelles sur des sites intermédiaires.

En juillet 2021 la chaîne des 5 étangs à déversoir de surface a réchauffé en moyenne l'eau de 2,1 °C. Si l'on admet que ce réchauffement était du même ordre en fin d'été, alors ces deux degrés sont presque reperdus entre le rocher des Fées et le Pic, selon un gradient de -0,12 °C/100m. Dans le bourg de Javerdat, 2200 m plus en aval, la tem-

7. En fait, le thermomètre automatique a été placé dans l'Oncre à 345 m en aval du déversoir de l'étang du Brudou. À quatre dates, une comparaison a été faite entre une mesure manuelle au déversoir même et la mesure enregistrée à 345 m en aval exactement au même moment. La différence n'a été que de 0,11 °C, si bien qu'on s'autorisera à assimiler les mesures en continu à la température de sortie de la chaîne d'étangs pour 2021. En revanche, en 2022, la prise de fond de l'étang ayant été ouverte, les deux sites ne sont plus assimilables.

8. Ayant été volé au bout de trois semaines.



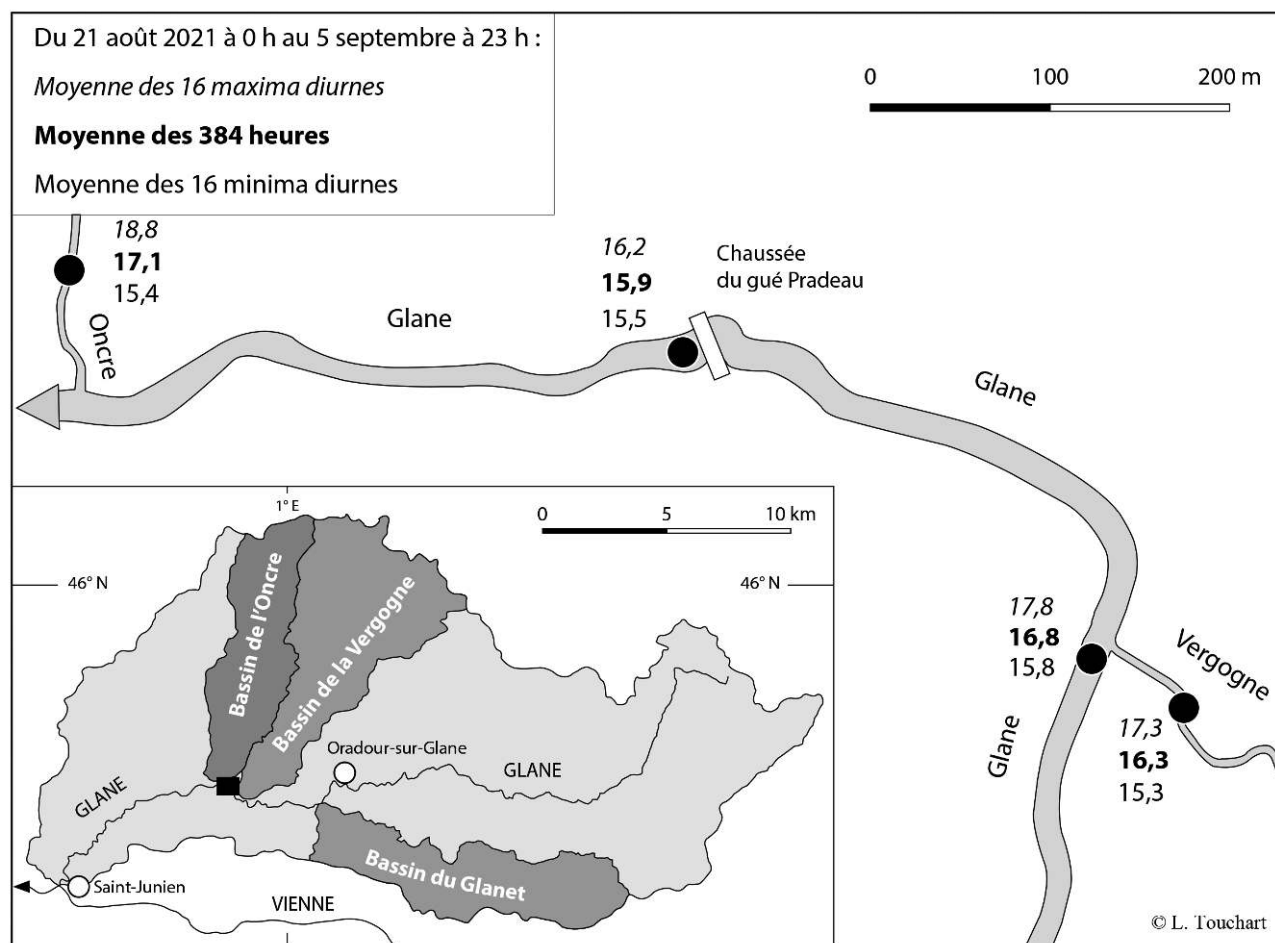


Figure 2 : Carte des températures de l'eau à l'embouchure des deux plus grands affluents de la Glane en été 2021
Map of water temperature on the mouth of the two largest tributaries of the River Glane in summer 2021

Du 6 au 20 juillet 2022 (360 heures)	Oncre	Vergogne	Glanet	Glane (en amont du confluent avec la Vergogne)
Moyenne	20,28	18,57	18,75	20,04
Écart-type	2,70	1,44	1,46	1,53
Moyenne des 15 maxima diurnes	24,26	20,00	19,73	21,49
Moyenne des 15 minima diurnes	16,84	16,99	17,03	18,47
Amplitude diurne périodique	7,42	3,01	2,70	3,02

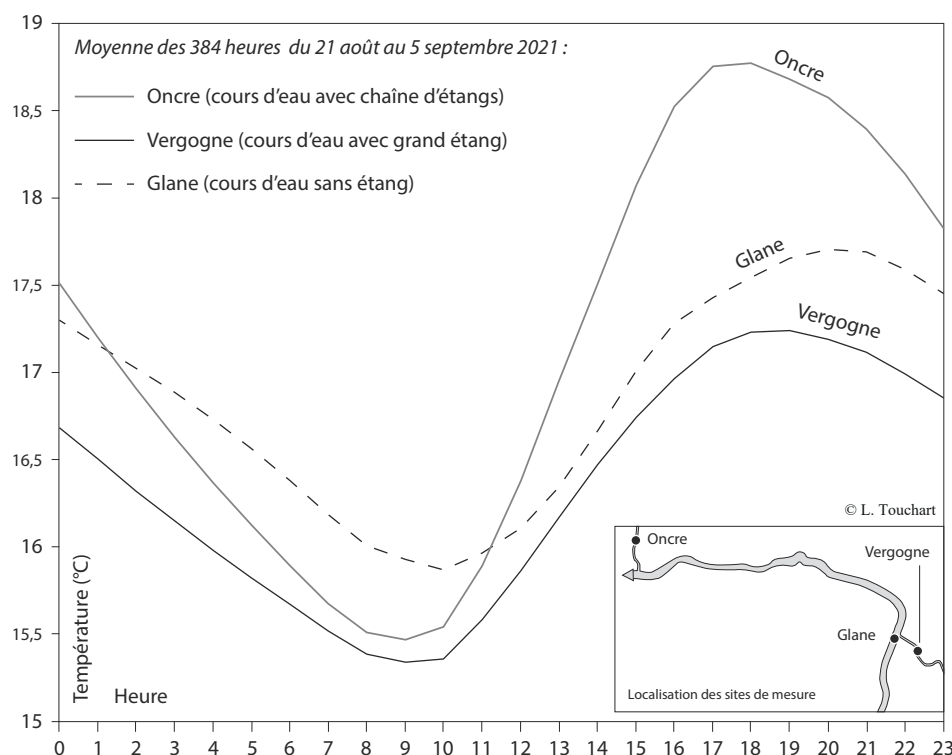
Tableau 4 : Les températures de l'eau à l'embouchure des trois plus grands affluents de la Glane en juillet 2022
Water temperatures on the mouth of the three largest tributaries of the River Glane in July 2022

pérature moyenne est de 2,09 °C plus basse qu'à la planche de granite du chaos des Fées, si bien que le réchauffement dû à la chaîne d'étangs a disparu. Sur les 4 km restant jusqu'à l'embouchure, la température reste ensuite inchangée (figure 4).

Au-delà des moyennes, les cycles diurnes restent les mêmes eux aussi. Ainsi, l'amplitude diurne périodique du 21 août au 5 septembre 2021 a été de 3,33 °C à Javerdat et de 3,31 à l'embouchure, soit 4 km plus en aval.

Figure 3 : Graphique du cycle diurne de la température de l'eau à l'embouchure des deux plus grands affluents de la Glane en été 2021

Graph of the diurnal water temperature cycle on the mouth of the two largest tributaries of the River Glane in summer 2021



À quatre dates de fin d'été et de début d'automne, des points intermédiaires ont été ajoutés ponctuellement, afin d'opérer une focale sur la partie du linéaire susceptible de connaître le rétablissement le plus rapide des qualités fluviales (figure 5). Du strict déversoir de l'étang du Brudou jusqu'au rocher des Fées, le gradient de refroidissement a été de 0,03 °C/100 m sur 345 m, puis il est monté à 0,09 °C/100 m sur 1 320 m jusqu'au confluent avec le ru de Las Fontanas, avant de redescendre à 0,01 °C entre celui-ci et le Pic. Cela veut dire que l'effet sur les moyennes n'est plus décelable au-delà de 1 665 m en aval du dernier déversoir de la chaîne d'étangs.

À l'échelle de la chaîne d'étangs de Fromental

Les prises de températures manuelles à la sortie des 6 derniers étangs de la chaîne qui en compte 55 en plusieurs branches confluentes permettent d'étudier l'influence précise des 5 étangs à déversoir les plus en aval sur le tronc principal de l'Oncre. Une moyenne annuelle des températures d'après-midi a été calculée sur 24 dates allant du 8 juin 2021 au

7 juin 2022. Elle s'accroît à chaque déversoir jusqu'à l'avant-dernier, mais baisse sur le dernier. C'est le 2^e étang qui réchauffe le plus, le 4^e qui réchauffe le moins. Les quatre premiers réchauffent l'eau de manière cumulée de 2,37 °C, le 5^e la refroidit de 0,99 °C, si bien que la chaîne des 5 étangs à déversoir réchauffe de 1,38 °C. En fréquence annuelle, c'est le déversoir de l'avant-dernier étang, celui de Fromental, qui est le plus souvent le plus chaud, mais l'antépénultième l'est quand même pendant 21 % du temps ; en fait c'est seulement pendant 8 % du temps que le dernier déversoir de la chaîne, celui du Brudou, est le plus chaud (figure 6).

DISCUSSIONS

La signature imprimée par les étangs aux affluents de la Glane : une augmentation de l'amplitude diurne

À petite échelle cartographique, la Glane et ses trois plus grands affluents intègrent tout un complexe de variables (tableau 5). L'Oncre et la Vergogne descendent des monts de Blond et l'altitude élevée de leur bassin supérieur est favorable à une eau froide, tandis que le Glanet et la Glane



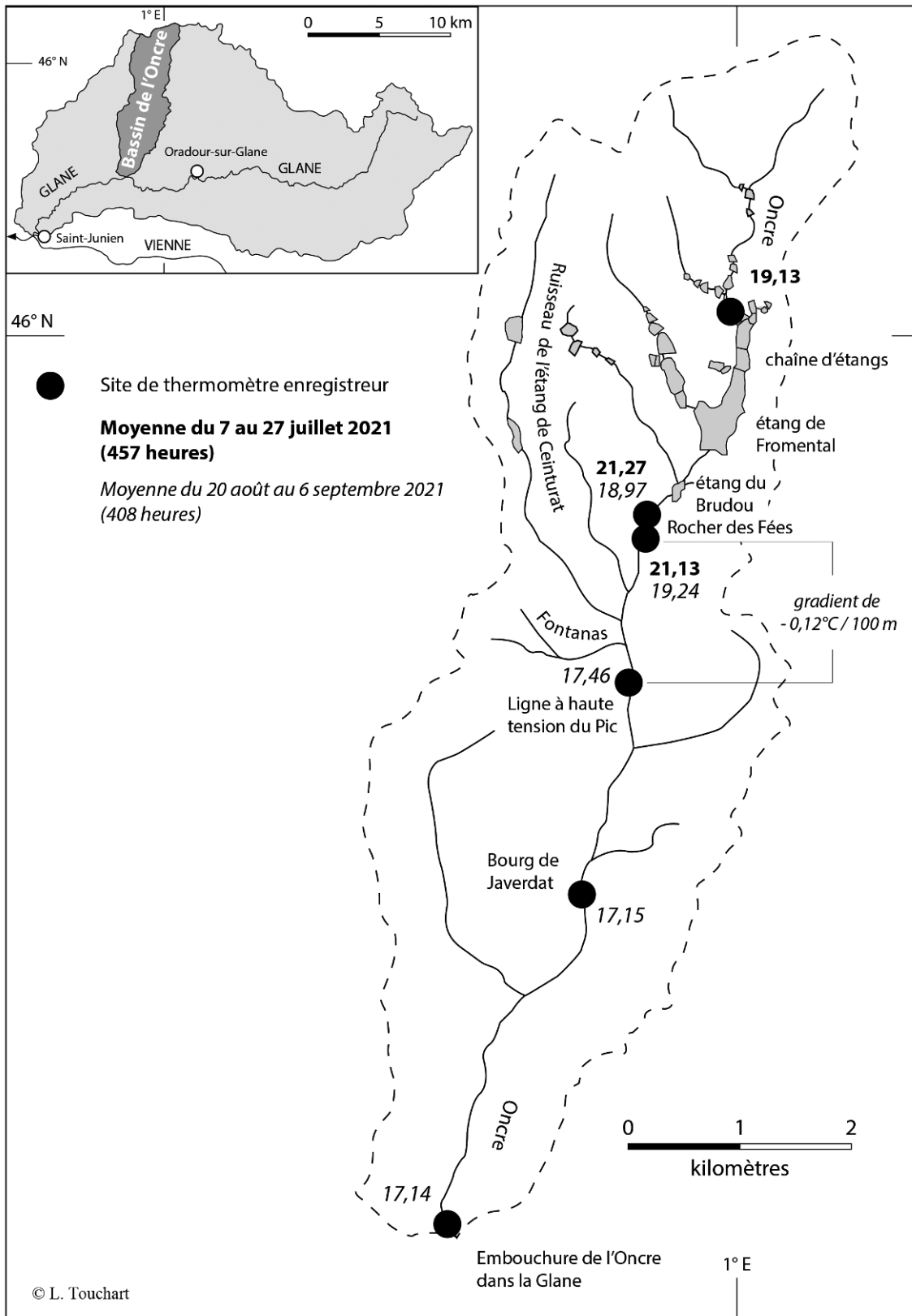


Figure 4 : Carte de l'évolution de la température de l'Oncre tout au long de son cours
Map of the evolution of water temperature of the River Oncre throughout its course

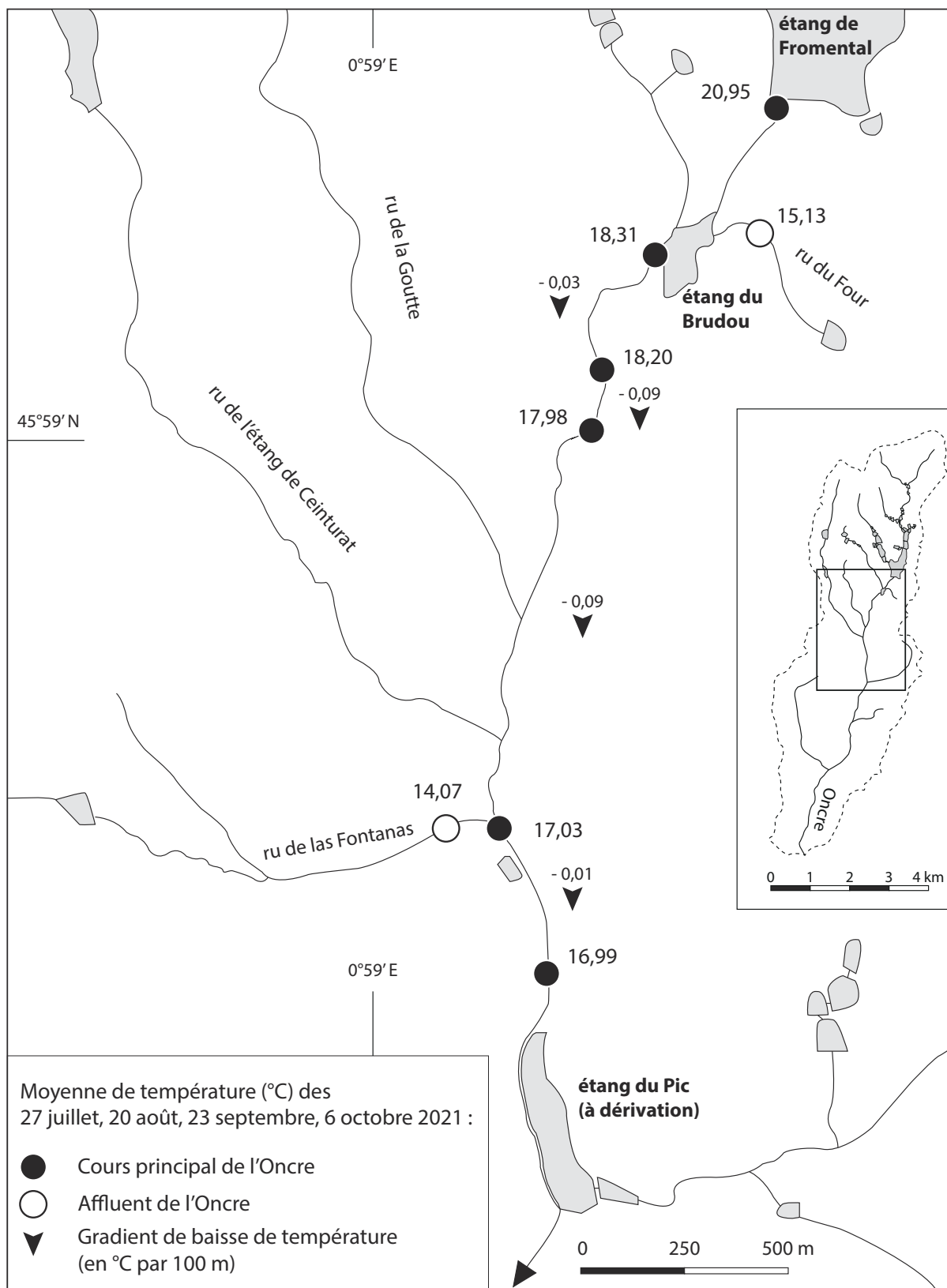


Figure 5 : Carte du rétablissement de la température fluviale de l'Oncre en aval de la chaîne d'étangs
Map of restoration of the water temperature characteristics of the River Oncre downstream of the cascade of ponds



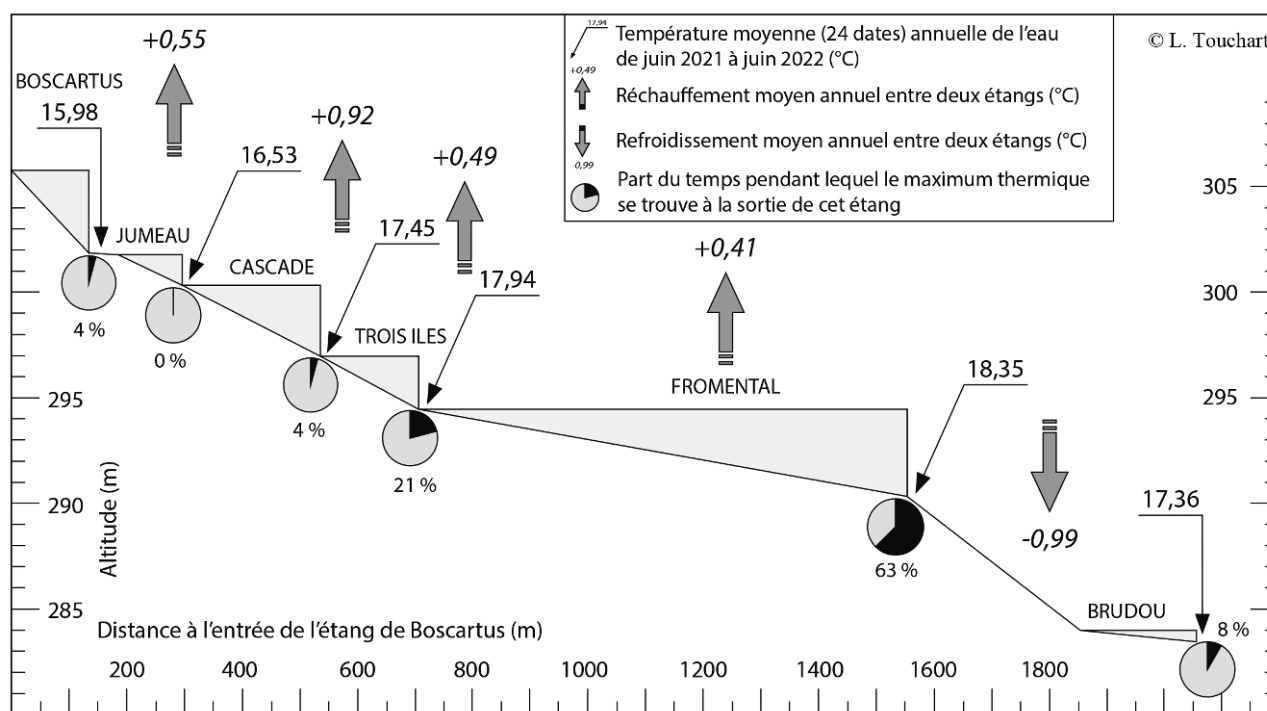


Figure 6 : Coupe de la température au déversoir des six derniers étangs de la chaîne de Fromental
 Cross-sectional profile of the water temperature on the outlet of the last six ponds of the Fromental cascade

Nom de l'affluent	Oncre	Vergogne	Glanet
Relief	Piémont	Piémont	Bas plateau
Débit	Faible	Fort	Faible
Boisement du bassin	Fort	Fort	Faible
Ripisylve	Forte	Faible	Forte
Stagnucité	Forte avec chaîne d'étangs	Moyenne avec un très grand étang	Faible
Température de l'eau comparée à la Glane	Égale	Moins élevée	Moins élevée

Tableau 5 : L'effet du complexe de variables des trois plus grands affluents de la Glane sur la température de l'eau
 The influence of variables complex set of the three largest tributaries of the Glane on the water temperature

avant les confluent sont des cours d'eau de bas plateau. La Vergogne et la Glane d'amont ont un débit brut important, favorable à l'écrasement des amplitudes, alors que l'Oncre et le Glanet sont moins abondants. En termes d'occupation du sol, les bassins de l'Oncre et de la Vergogne sont plus boisés, respectivement occupés par 44 % et 38 % de forêts, alors que celui du Glanet, plus ouvert (31 % de forêts), risque un réchauffement plus important de ce fait. La proportion du linéaire de ces trois cours d'eau ayant une ripisylve place toujours l'Oncre en tête (42 %), mais le Glanet est plus directement ombré (40 %) que la Vergogne (29 %). Il faut ajouter

que le tronc principal de la Glane est non seulement le réceptacle de tous les affluents et de leurs effets s'ajoutant ou s'annulant, mais souffre aussi un bruit de fond propre, par la succession des seuils et des moulins qui s'y succèdent⁹.

9. Nous en avons quantifié un exemple par le placement d'un thermomètre automatique en contrebas d'une vieille chaussée déversante permettant à un chemin rural de traverser la Glane à mi-distance des confluent de la Vergogne et de l'Oncre : le gué Pradeau. Ici, l'eau est refroidie de 0,9 °C en moyenne estivale par rapport à 325 m en amont et, surtout, les amplitudes sont écrasées, ces deux effets étant contraires à ceux mesurés par Donati (2021) au niveau de seuils de moulin. Il est possible que le caractère ombragé de la petite retenue en amont du seuil empêche toute micro-stratification tout en favorisant, par son volume, une baisse des écarts diurnes.

Parmi les multiples variables d'influence, les caractéristiques stagnustres forment le cœur de cette étude. Elles distinguent les bassins de sorte que l'Oncre, très riche en étangs, est barré par une grande chaîne en escalier, la Vergogne, de stagnucité intermédiaire, a son cours principal barré par un très grand étang, cependant que le Glanet est le plus pauvre en étangs.

Or il se trouve que, à leur confluent avec la Glane, ces trois rivières ont une température estivale moyenne inférieure ou égale à celle du tronc principal. L'explication peut être que le complexe de variables contraires s'annule, ou bien que l'influence des étangs a déjà pratiquement disparu à l'embouchure de ces rivières dans la Glane, ou encore le fait que la moyenne de toutes les données n'est pas un bon marqueur. Pour comparaison, dans le cadre de l'étude ICRA du bassin vosgien de la Sauer, pendant le semestre chaud, le Soultzbach, qui compte plusieurs étangs, se réchauffe en moyenne de 4,1 °C entre l'amont et l'aval, cependant le Trautbach, sans plan d'eau, voit son cours se réchauffer de 2,5 °C sur la même distance (mesures de 2020, données non publiées).

Dans le détail, en été 2021, l'eau la plus froide est mesurée en moyenne à l'embouchure de la Vergogne, pourtant de forte stagnucité et barrée par le grand étang de Cieux, mais dont le bassin a les altitudes les plus élevées. L'eau la plus chaude est certes mesurée à l'embouchure de l'Oncre, en aval de la grande chaîne d'étangs, mais l'eau du tronc principal de la Glane en amont de ces deux confluent, dont le bassin a une stagnucité deux fois inférieure, est plus chaude que celle de la Vergogne. L'ajout d'un thermomètre à l'embouchure du Glanet, pauvre en étangs, en été 2022, confirme cette hypothèse, donnant une moyenne de température plus chaude que celle de la Vergogne.

Au-delà des moyennes, dont les écarts ne sont finalement pas significatifs, deux marqueurs de l'effet des étangs limousins à déversoir, connus depuis les études de Touchart (2001), se retrouvent ici. Il s'agit d'une part de l'augmentation de l'amplitude diurne, très marquée en été 2022, chaud et sec, mais déjà notable en été 2021, d'autre part de l'avancée temporelle du cycle diurne. Selon ces deux critères, c'est bien l'Oncre, avec sa chaîne d'étangs et sa stagnucité maximale, qui devance la Vergogne, avec sa stagnucité intermédiaire et son grand étang, qui devance elle-

même la Glane avant les deux confluent (figure 3). Il est à noter que l'accroissement de l'amplitude diurne a aussi été mesuré sur d'autres terrains, notamment au Canada par Maheu *et al.* (2016), en Bresse par Chandesris *et al.* (2019), au point que Seyedhashemi *et al.* (2021) l'érigent en signature de l'influence des petits barrages à déversoir.

Ainsi, l'effet des étangs de l'Oncre, invisible dans les moyennes, peut être décelé par des critères plus fins comme l'augmentation de l'amplitude diurne et l'avancée du cycle diurne. On pourrait ajouter l'accroissement de la variance, très marqué pour l'Oncre qui provient de la chaîne d'étangs, si ce n'était qu'il est inexistant dans la Vergogne qui sort du Grand Etang de Cieux. Cela montre que, à leur embouchure dans la Glane, les cours d'eau étudiés ont déjà effectué une partie du rétablissement de leurs qualités fluviales, cependant que la signature des étangs reste visible. Ce point mérite une étude à part entière, qu'il convient d'effectuer à moyenne échelle.

L'Oncre rétablit partiellement ses caractères fluviaux en aval de la chaîne d'étangs

Si l'on considère que le réchauffement de l'Oncre dû à la chaîne d'étangs est perdu sur les 1 665 m (station manuelle de Las Fontanas) ou 2 040 m (station automatique du Pic) en aval du déversoir de l'étang du Brudou, on peut comparer cette distance avec celle de 1 000 m mesurée sur la Vergogne en aval du grand étang de Cieux par Touchart (2001). Vu la proximité des deux terrains, il est possible d'en déduire que la chaîne d'étangs provoque un effet se prolongeant sur une distance un peu plus longue que l'impact d'un grand étang. La distance d'influence de la chaîne d'étangs de l'Oncre est également du même ordre de grandeur que celle, de 1 300 m en moyenne, donnée dans la bibliographie internationale pour les petits barrages (Zaidel *et al.*, 2021), mais plus longue que celle de 300 à 650 m estimée par Maxted *et al.* (2005) en aval de petits étangs néo-zélandais.

Il est à noter que notre discussion à l'échelle de l'ensemble de l'Oncre n'effectue que des comparaisons relatives et ne cherche pas à reconstituer une hypothétique température initiale, ou une température de référence sans étang. Devant une chaîne de plus d'une cinquantaine d'étangs en tête de bas-



sin et la présence d'étangs sur source ou sur cours temporaire de rang 0 pour pratiquement tous les sous-affluents quelle que soit leur taille, cet exercice serait trop théorique et n'offrirait aucune possibilité de vérification. De ce point de vue, nous ne cherchons pas à répondre à la méthodologie ICRA, qui est préconisée pour évaluer l'impact d'un plan d'eau isolé à construire¹⁰, préférant nous inscrire dans une démarche de réflexion proche de celle de Dufour (2017), pour qui les aménagements humains intégrés à un hydrosystème ne sont pas regardés comme un élément extérieur produisant forcément un impact négatif, qui nécessiterait un retour à l'état initial. Il convient cependant de rappeler que le point de départ de nos mesures se trouve être la sortie de l'étang de Boscartus, seul endroit muni d'un moine dans une chaîne formée de plans d'eau à déversoir de surface. Cette particularité réinitialise en quelque sorte les caractéristiques thermiques, si bien que la quantification de l'effet des cinq suivants, sans pouvoir être assimilée à celle de l'effet de l'ensemble de la chaîne, estime tout de même l'effet d'une succession d'étangs à surverse sur une eau de départ fraîche et de faible amplitude diurne.

En outre, les mesures réalisées loin en aval des étangs sur source pour le ru du Four et pour celui de Las Fontanas permettent d'approcher quelque peu la notion de température de référence (figure 5). Lors de 25 dates communes réparties sur un an, de juin 2021 à mai 2022, le ru du Four à l'entrée de l'étang du Brudou était en moyenne de 2,93 °C plus froid que le déversoir du même étang, le réchauffement dû à la chaîne d'étangs complète s'étirant d'avril à novembre, le refroidissement de décembre à mars. Lors de 20 dates communes réparties sur la même période, le ru du Four était en moyenne de 1,88 °C plus froid que l'Oncre à la sortie du moine de l'étang de Boscartus, le réchauffement dû à la partie amont de la chaîne d'étangs courant de mai à septembre, le refroidissement d'octobre à avril. Lors de 4 dates communes, allant du 27 juillet au 6 octobre 2021, le ru de Las Fontanas était en moyenne de 4,24 °C plus froid que le déversoir de l'étang du Brudou. Au total, ces valeurs ne comprenant aucune mesure

nocturne et, dans le cas de Las Fontanas, aucune de saison froide, le réchauffement de 3 à 4 °C provoqué par la chaîne d'étangs doit être considéré comme un plafond, au-dessus des moyennes.

Le fonctionnement indépendant de chaque étang de la chaîne de Fromental

Le cumul de chaleur n'est pas suffisant pour que ce soit toujours le dernier déversoir de la chaîne d'étangs qui soit plus chaud que l'avant-dernier, lui-même plus chaud que l'antépénultième, et ainsi de suite. Il existe donc d'autres variables importantes, voire prédominantes.

Si l'on prend chaque étang comme un individu indépendant, le type de sortie d'eau et son encadrement jouent manifestement un rôle majeur. La température la plus froide est en moyenne mesurée à la sortie de l'étang à moine. Mais cet étang de Boscartus est aussi, avec le suivant, celui dont l'environnement est le plus forestier. Ces deux étangs, assez peu larges, sont à l'ombre la majeure partie du temps et il se trouve que leurs sorties d'eau sont les deux plus fraîches de la chaîne, le premier fût-il à moine et le deuxième à déversoir. D'ailleurs l'étang Jumeau est le seul à n'avoir jamais été le plus chaud des six, l'ombrage du déversoir semblant être, à certains moments, encore plus efficace que la présence d'un moine. Concernant les quatre derniers étangs, tous à sortie d'eau superficielle, leur déversoir est construit à l'extrémité orientale de la chaussée pour l'étang de la Cascade et celui des Trois îles, sur le bord ouest pour Fromental et au nord-ouest pour le Brudou. Grâce à la proximité de la forêt, le déversoir de la Cascade est donc à l'ombre le matin et ceux de Fromental, et du Brudou le soir. Dans le cas de l'étang des Trois îles, les boisements sont trop éloignés du déversoir pour exercer un effet. Quelques mesures effectuées le matin, notamment celles du 2 juillet 2021, ont montré une température fraîche au déversoir de la Cascade, alors le seul des quatre bien à l'ombre.

La variable du type de sortie d'eau et de son encadrement peut être approfondie en prenant un cas particulier, celui du 17 juin 2022, une journée caniculaire à fort ensoleillement, pendant laquelle, au moment des mesures, la température de l'air était de 36 °C (figure 7). Cette journée est celle de toutes nos mesures sur un an et demi qui a vu

10. « L'importance de la modification de la variable peut être estimée via son intensité : différence entre la valeur 'naturelle' dans le cours d'eau (valeur qu'aurait la variable en l'absence de retenue) et la valeur 'impactée' à l'aval direct de la restitution de la retenue dans le cours d'eau. La valeur 'naturelle' peut être évaluée par modélisation en l'absence de retenue ou être estimée en prenant la valeur à l'amont de la restitution » (Bellot, 2017, pp. 82-83).

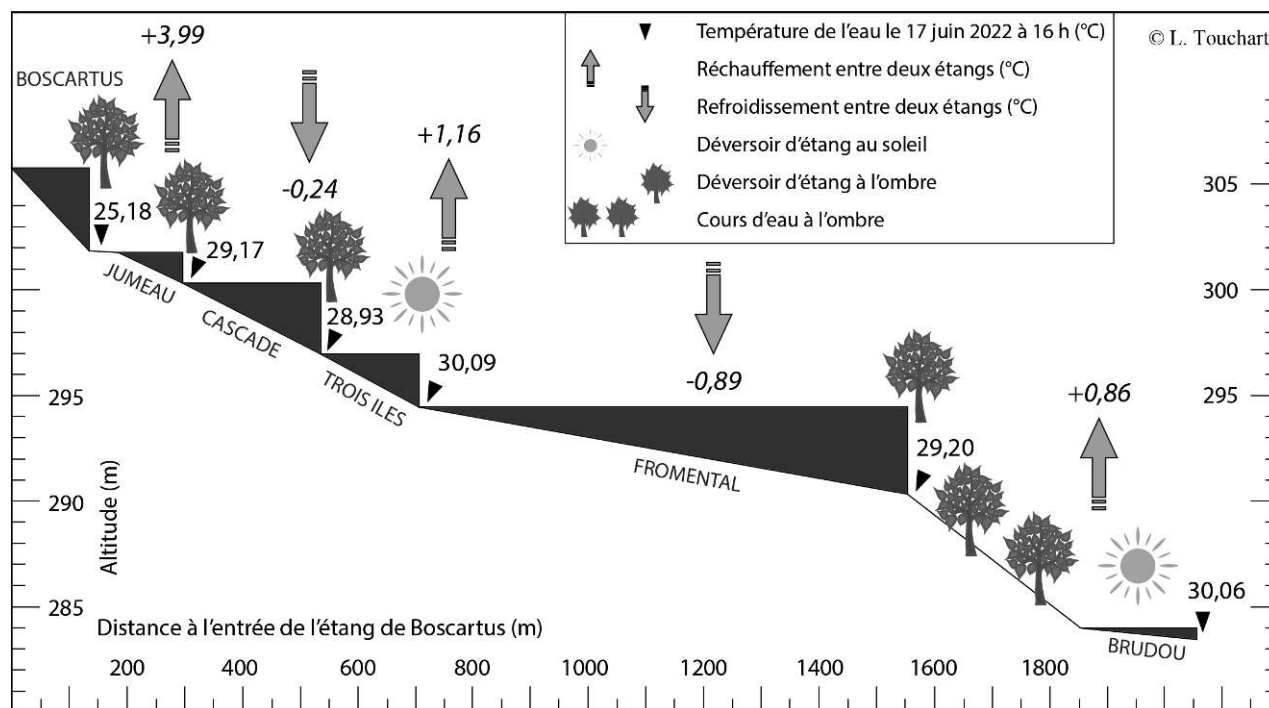


Figure 7 : Coupe de la température des six derniers étangs de la chaîne de Fromental en lien avec l'ensoleillement ou l'ombrage de leur déversoir

Cross-sectional profile of the water temperature on the output of the last six ponds of the Fromental cascade in connection with the sunny or shaded situation of their outlet

le plus grand écart entre la température du moine, la plus froide, et celle, plus chaude, de tous les étangs à déversoir. Parmi ceux-ci, tous très chauds, les records ont été atteints justement au niveau des deux déversoirs en plein soleil, ceux des Trois Iles et du Brudou, alors que les autres, à l'ombre, avaient une température plus basse. Cet exemple montre bien que le cumul thermique d'amont en aval est loin d'être le facteur principal, puisque la suite des étangs donne une évolution des températures faisant se succéder une montée, une baisse, une montée, une baisse, une montée.

La variable de la morphométrie de chaque étang est d'autant moins facile à isoler que, en termes de superficie et de profondeur, les deux étangs qui se distinguent de tous les autres, celui de Fromental, très étendu, et celui du Brudou, peu profond, sont aussi les deux plus en aval de toute la chaîne. Les mesures montrent que c'est l'étang de Fromental qui a le comportement le plus distinctif. C'est, en moyenne et en fréquence, le plan d'eau le plus chaud de la chaîne. Cependant, sa grande taille peut au contraire, dans certains cas, provoquer un rafraîchissement de son déversoir par rapport aux autres.

La journée du 8 juillet 2022, pendant laquelle un beau temps ensoleillé s'accompagnait d'un fort vent de NNE, a été éloquent à cet égard. Le déversoir de Fromental était alors plus froid que ceux du Brudou, des Trois Iles et du Jumeau. Il est vrai que la course du vent sur l'étang de Fromental atteignait alors près de 800 m, provoquant sans doute un brassage forcé de l'ensemble du plan d'eau, emmenant les calories en profondeur et faisant remonter en surface des strates plus fraîches.

CONCLUSION

Tant en valeur moyenne de réchauffement (environ 2 °C en été) qu'en longueur d'influence sur l'émissaire (environ 1,5 km), l'effet des cinq derniers étangs de la chaîne de l'Oncre est finalement du même ordre que celui d'un seul grand étang isolé (Touchart, 2001) ou d'un petit barrage (Zaidel *et al.*, 2021) à déversoir. Le sixième étang, en remontant de la fin de la chaîne vers l'amont, étant le seul pourvu d'un moine, la température de référence de cette recherche, sans pouvoir être assimilée à celle de la source de l'Oncre, a néanmoins des caractères

de fraîcheur et de faible amplitude diurne qui permettent de l'envisager comme un point de départ.

Dans le cas de la valeur de la température de l'eau, l'effet de la succession des plans d'eau est infra-additif, au sens de LaGory *et al.* (1989). L'impact cumulé géographique correspond ici à la somme du linéaire directement modifié par la chaîne étangs et du linéaire de l'émissaire influencé en aval sur la distance précédemment citée. Au lieu d'un effet cumulatif en valeur de réchauffement, il y a plutôt un fonctionnement presque indépendant de chaque étang de la chaîne. Cela tendrait à confirmer ce que Bolsenga (1975) avait exprimé il y a déjà longtemps pour les grands lacs naturels et qui a été validé depuis par Momii et Ito (2008), c'est-à-dire que la part radiative du bilan thermique d'un plan d'eau est en général si écrasante que la part hydrologique d'entrée et de sortie des cours d'eau est comparativement négligeable. Ici, dans le cas de la chaîne de l'Oncre, le filet d'eau qui passe d'un étang à l'autre, très réduit en été, ne pèse pas grand-chose sur le plan calorifique par rapport au bilan radiatif. Précédemment, Choffel (2019) avait montré qu'il existait des différences de température notables entre les parties ombragées et ensoleillées d'un étang isolé. Quant à Maxted *et al.* (2005) et Zaidel *et al.* (2021), ils concluaient que le réchauffement du réseau hydrographique dû aux petits plans d'eau à déversoir était surtout causé par le fait qu'ils fabriquent un espace plus large, donc ensoleillé, là où le cours d'eau était à l'ombre avant leur construction. D'une façon plus générale, la littérature internationale des dernières années commence à montrer que, même non barrés de plans d'eau, les petits cours d'eau présentent une hétérogénéité thermique conditionnée non seulement par les apports d'eau souterraine ou hyporhéique, mais aussi par les différences entre les parties à l'ombre et au soleil (Story *et al.*, 2003, Malcolm *et al.*, 2004, Webb *et al.* 2008, Marteau *et al.*, 2022, Hoess *et al.*, 2022). Dans ce cadre, la présente étude aura donné quelques premiers résultats mesurant que, dans le cas d'étangs en chaîne, cette variable ombre/soleil est plus forte que l'effet de cumul de la succession des plans d'eau. Au moins de façon ponctuelle, un étang à l'ombre situé en milieu de chaîne est capable de laisser sortir de son déversoir une eau plus froide que celle qui y entre. Dans les moyennes cependant, la chaîne étudiée ici est construite de sorte que les deux étangs

les plus en amont sont aussi les plus forestiers, les plus ombrés, si bien que, à l'intérieur du bilan calorifique, la variable radiative va dans le même sens que la variable hydrologique. Il conviendrait à l'avenir de lancer des études sur une autre chaîne d'étangs, où ces variables iraient dans un sens opposé.

En termes de recherche appliquée, il semblerait opportun de préconiser l'ombrage des déversoirs de surface des étangs et des premiers décamètres de leur émissaire fluvial là où ce n'est pas le cas, car l'efficacité de cette opération n'est pas n'est pas loin d'atteindre à celle de la construction d'un moine. D'autre part, le dernier étang de la chaîne est celui sur lequel doivent porter les principaux efforts. C'est lui qui, plus que le cumul de ce qui se passe en amont, conditionne la qualité de l'eau de l'émissaire fluvial.

Bibliographie

- AVAKIAN A.V., 1998. Volga-Kama cascade reservoirs and their optimal use. *Lakes and Reservoirs. Research and Management*, vol. 3, n° 2, p. 113-121.
- BARBOSA F., PADISÁK J., ESPÍNDOLA E., BORICS G. AND ROCHA O., 1999. The cascading reservoir continuum concept (CRCC) and its application to the river Tietê-basin, São Paulo State, Brazil, in TUNDISI, J.G. and STRASKRABA, M. (Eds.) *Theoretical Reservoir Ecology and its Applications*. Leiden, Brazilian Academy of Sciences, International Institute of Ecology and Backhuys Publishers, p. 425-437.
- BARTOUT P., 2006, *Pour un référentiel des zones humides intérieures de milieu tempéré : l'exemple des étangs en Limousin (France)*. Typologies, régionalisation. Université de Limoges, thèse de doctorat en géographie, 497 p.
- BELLOT C. AUGEARD B., BERREBI R., MAGAND C., 2017. *Comment étudier le cumul des impacts des retenues d'eau sur les milieux aquatiques ?* Agence Française pour la Biodiversité, 101 p. (non publié).
- BERGKAMP G., McCARTNEY M., DUGAN P., McNEELY J., ACREMAN M., 2000. *Dams, Ecosystem Functions and Environmental Restoration*. Cape Town, International Rivers, World Commission on Dams, 187 p.
- BOLSENGA S., 1975. Estimating energy budget components to determine Lake Huron evaporation, *Water Resources Research*, vol. 11, n° 5, p. 661-666.
- BOUTAULT F., 2020. *Étude de l'impact cumulé des facteurs d'anthropisation sur la Dordogne moyenne et préconisations en vue de la restauration écologique du cours d'eau*. Université Lyon 3, thèse de doctorat en géographie, 213 p.
- BRAVARD J.-P., LÉVÊQUE Ch., Dir., 2020. *La gestion écologique des rivières françaises, regards de scientifiques sur une controverse*. Paris, L'Harmattan, 361 p.
- BROOKER M.P., 1981. The impact of impoundments on the downstream fisheries and general ecology of rivers, *Advances in Applied Biology*, vol. 6, p. 91-152.



- CARLUER N., BABUT M., BELLARD J., BERNEZ I., BURGER-LEENHARDT D., DORIOZ J.M., DOUEZ O., DUFOUR S., GRIMALDI C., HABETS F., LE BISSONNAIS Y., MOLÉNAT J., ROLLET A.J., ROSSET V., SAUVAGE S., USSEGLIO-POLATERA P., LEBLANC B., 2016. *Impact cumulé des retenues d'eau sur le milieu aquatique. Expertise scientifique collective. Synthèse du rapport*. IRSTEA, 84 p. + annexes (non publié).
- CAVALIER-LEBRUN J., 2020. *Evaluation de l'impact cumulé des retenues d'eau sur les milieux aquatiques sur le bassin versant de la Sarthe aval*. AgroParisTech, Mémoire de diplôme d'ingénieur, 57 p.
- CHANDESRIIS, A., VAN LOOY, K., DIAMOND, J.S., SOUCHON, Y., 2019. Small dams alter thermal regimes of downstream water. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 23, p. 4509-4525.
- CHOFFEL Q., 2019. *La différenciation des masses d'eau à l'intérieur de l'étang : stratification verticale, zonation horizontale, bilan thermique et centre thermique (étangs limousins et vosgiens, comparaisons internationales)*. Université d'Orléans, thèse de doctorat en géographie, 404 p.
- CREN (Conservatoire régional des espaces naturels) Limousin, 2011. *Étang du Brudoux*. 2 p. (non publié). <https://www.conservatoirelimousin.com/la-liste-des-sites/site/33-etang-du-brudoux.html>
- DONATI F., 2021. *Les retenues de seuil, une question limnologique ? Étude hydrodynamique, thermique et sédimentaire (Loiret, Moselle, Mayenne)*. Université d'Orléans, thèse de doctorat en géographie, 236 p.
- DIREN LIMOUSIN, 2008. *La Glane*. 2 p. (non publié). https://www.nouvelle-aquitaine.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/L08-030_cle595c1c.pdf
- DUFOUR S., 2017. *Une approche géographique de la végétation et de la gestion biophysique des hydrosystèmes fluviaux*. Université de Rennes 2, thèse d'HDR en géographie, vol. 1, 270 p.
- GRIMALDI C., coord., 2016. Physico-chimie, in CARLUER N., BABUT M., BELLARD J., BERNEZ I., LEBLANC B., BURGER-LEENHARDT D., DORIOZ J.-M., DOUEZ O., DUFOUR S., GRIMALDI S. HABETS F., LE BISSONNAIS Y. MOLENAT J., ROLLET A.-J., ROSSET V., SAUVAGE S., USSEGLIO-POLETERA P., *Impact cumulé des retenues d'eau sur le milieu aquatique, expertise scientifique collective*. Paris, Agence Française pour la Biodiversité, coll. « Comprendre pour agir », 118 p.
- HABETS F., MOLÉNAT J., CARLUER N., DOUEZ O., LEENHARDT D., 2018. The cumulative impacts of small reservoirs on hydrology: a review, *Science of the Total Environment*, n° 643, p. 850-867.
- Habets R., GENERALI K.A., KUHN J., GEIST J., 2022. Impact of Fish Ponds on Stream Hydrology and Temperature Regime in the Context of Freshwater Pearl Mussel Conservation, *Water*, vol. 14, n° 16, 2490, <https://doi.org/10.3390/w14162490>
- JOÃO E., 2007. A research agenda for data and scale issues in Strategic Environmental Assessment (SEA), *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 27, n° 5, p. 470-491.
- LAGORY K.E., STULL E.A., VINIKOUR W.S., 1989, A proposed methodology to assess the cumulative impacts of hydroelectric developments in the Columbia River basin, Portland, Bonneville Power Administration, & Argonne National Laboratory, 28 p. (unpublished report).
- LITVINOV A.S., ROŠUPKO V.F., 1992, Les modifications du régime thermique de la Volga dans un contexte de niveaux régulés. *Vodnye Resursy (Ressources en eau)*, n° 6, p. 44-40 (en russe).
- LU L., ZOU X., YANG J., XIAO Y., WANG Y., GUO J., LI Z., 2020. Biogeography of eukaryotic plankton communities along the upper Yangtze River: The potential impact of cascade dams and reservoirs. *Journal of Hydrology*, vol. 590, article 125495. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2020.125495.
- MAHEU A., ST-HILAIRE A., CAISSIE D., EL-JABI N., 2016. Understanding the Thermal Regime of Rivers Influenced by Small and Medium Size Dams in Eastern Canada, *River Research and Applications*, vol. 32, n° 10, p. 2032-2044.
- MALCOLM I.A., HANNAH D.M., DONAGHY M.J., SOULSBY C., YOUNGSON A.F., 2004. The influence of riparian woodland on the spatial and temporal variability of stream water temperatures in an upland salmon stream, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 8, p. 449-459.
- MARTEAU B., PIÉGAY H., CHANDESRIIS A., MICHEL K., VAUDOR L., 2022, Riparian shading mitigates warming but cannot revert thermal alteration by impoundments in lowland rivers, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 47, n° 9, p. 2209-2229.
- MAXTED J.R., MCCREADY C.H., SCARSBROOK M.R., 2005. Effects of small ponds on stream water quality and macroinvertebrate communities, *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, vol. 39, n° 5, p. 1069-1084.
- Molénat J., Habets F., coord., 2016. Hydrologie-hydrogéologie, in CARLUER N., BABUT M., BELLARD J., BERNEZ I., LEBLANC B., BURGER-LEENHARDT D., DORIOZ J.-M., DOUEZ O., DUFOUR S., GRIMALDI S. HABETS F., LE BISSONNAIS Y. MOLENAT J., ROLLET A.-J., ROSSET V., SAUVAGE S., USSEGLIO-POLETERA P., *Impact cumulé des retenues d'eau sur le milieu aquatique, expertise scientifique collective*. Paris, Agence Française pour la Biodiversité, coll. « Comprendre pour agir », 76 p.
- MOMII K., ITO Y., 2008. Heat budget estimates for Lake Ikeda, Japan, *Journal of Hydrology*, vol. 361, n° 3-4, p. 362-370.
- MOURA A.N., SEVERIANO J.S., TAVARES N.K., DANTAS E.W., 2013, The role of a cascade of reservoirs and seasonal variation in the phytoplankton structure in a tropical river. *Brazilian Journal of Biology – Revista Brasileira de Biologia*, vol. 73, n° 2, p. 291-298.
- RICHARD S., SAGNES P., COURRET D., 2022. *Synthèse des principaux impacts écologiques engendrés par les aménagements hydroélectriques et de leurs conséquences sur le fonctionnement des cours d'eau*. Toulouse, Office Français de la Biodiversité, 22 p. (non publié).
- SABV (Syndicat d'aménagement du bassin de la Vienne), 2014. *Vers une gestion des étangs du bassin de la Vienne pour atteindre le bon état écologique des eaux*. Limoges, 23 p. (non publié) [http://www.eptb-vienne.fr/IMG/pdf/2_SABV_Etangs_2014_05_13-2.pdf].
- SANTUCCI V.J., GEPHARD S.R., PESCIPELLI S.M., 2005. Effects of Multiple Low-Head Dams on Fish, Macroinvertebrates,



- Habitat, and Water Quality in the Fox River, Illinois, *North American Journal of Fisheries Management*, vol. 25, n° 3, p. 975-992.
- SEITZ N. E., WESTBROOK C. J., NOBLE B. F., 2011. Bringing science into river systems cumulative effects assessment practice, *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 31, n° 3, p. 172-179.
- SEYEDHASHEMI H., MOATAR F., VIDAL J.-P., DIAMOND J.S., BEAUFORT A., CHANDESRI S., VALETTE L., 2021. Thermal signatures identify the influence of dams and ponds on stream temperature at the regional scale, *Science of the Total Environment*, n° 766, p. 1-13. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2020.142667.
- STORY A., MOORE R.D., MACDONALD J.S., 2003. Stream temperatures in two shaded reaches below cut blocks and logging roads: downstream cooling linked to subsurface hydrology. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 33, p. 1383-1396.
- STORY, R., ROSS B., 2007. Cumulative effects assessment: does scale matter? *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 27, n° 5, p. 365-385.
- THOMPSON J. C., 2012. *Impact and Management of Small Farm Dams in Hawke's Bay, New Zealand*. Wellington, Victoria University, thesis in physical geography, 215 p.
- TOUCHART L., 1999. La température de l'eau en Limousin, *Norois*, vol. 46, n° 183, p. 441-451.
- TOUCHART L., 2001. *De la température de l'eau à la géographie des lacs*. Université de Limoges, thèse d'HDR en géographie, 480 p.
- TOUCHART L., 2003. Le régime de la Glane, in *Hydrologie, mers, fleuves et lacs*. Paris, Armand Colin, p.149-152.
- TOUCHART L., 2016. Le bilan thermique des étangs : réflexions épistémologiques et application aux étangs limousins, *Annales de Géographie*, vol. 125, n° 708, p. 143-169.
- VERNEAUX J., 1973. Cours d'eau de Franche-Comté (massif du jura). Recherches écologiques sur le réseau hydrographique du Doubs. *Annales scientifiques de l'Université de Besançon*, 3^e série, zoologie, physiologie et biologie animale, fasc. 9, tiré-à-part, 260 p.
- WANG Y., ZHANG N., WANG D., WU J., 2020. Impacts of cascade reservoirs on Yangtze River water temperature: Assessment and ecological implications. *Journal of Hydrology*, vol. 590, Article 125240. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125240.
- WEBB B.W., HANNAH D.M., MOORE R.D., BROWN L.E., NOBILIS F., 2008. Recent advances in stream and river temperature research, *Hydrological processes*, vol. 22, p. 902-918.
- WILLIAMS O.O., 1968. Reservoir effect on downstream water temperatures in the upper Delaware river basin, *United States Geological Survey Professional Paper*, n° 600B, p. 195-199.
- ZAIDEL P.A., ROY A.H., HOULE K.M., LAMBERT B., LETCHER B.H., NISLOW K.H., SMITH C., 2021. Impacts of small dams on stream temperature, *Ecological Indicators*, n° 120, p. 1-13. DOI : 10.1016/j.ecolind.2020.106878.
- ZHANG P., CAI Y., XIE Y., YI Y., YANG W., LI Z., 2022. Effects of a cascade reservoir system on runoff and sediment yields in a River Basin of southwestern China. *Ecological Engineering*, vol. 179. DOI : 10.1016/j.ecoleng.2022.106616.

