

Colloque
"Gestion des eaux souterraines"
Bordeaux - 2023

Article étendu

Titre
Suivi expérimental des apports souterrains sur la Touques (Normandie, France) sur une longue durée.
Nom des auteurs
MOULIN, Nelly ¹ ; THOMAS, Zahra ¹ ; LE LAY, Hugo ¹ ; ROUAULT, François ¹ ; DARDAILLON, Bruno ² ; GRESSELIN, Frederic ²
Affiliation
¹ Institut Agro, Rennes ² DREAL Normandie, Caen

Introduction

De nombreux facteurs peuvent influencer le régime thermique d'un cours d'eau. Ceux-ci peuvent être climatiques (température de l'air, pluviométrie, vent...) ou environnementaux (densité de la ripisylve, apports d'eau souterraine, type de sol...)¹. Parmi les facteurs environnementaux, les apports d'eau souterraine peuvent notablement modifier le régime thermique d'une rivière. Ces apports peuvent prendre plusieurs formes : suintements de long des berges, débouché d'une source ou exfiltration de la zone hyporhéique. Ils sont souvent difficiles à localiser et identifier et leur cartographie reste encore un défi dans de nombreuses zones². De plus, ces apports varient dans le temps au fil des saisons et selon des cycles allant jusqu'à plusieurs années.

Sur un tronçon de la Touques, en amont de la commune de Mardilly (61), un suivi expérimental a été mis en place sur l'année 2021-2022 afin de localiser des zones d'apports de nappe de manière précise. Ensuite, ces apports ont été instrumentés sur la période 2022-2023 à l'aide de dispositifs MOLONARI afin de suivre leur évolution au cours de l'année. Ainsi, deux dispositifs complémentaires ont été déployés sur une durée totale d'un et demi afin de cartographier 150m de rivière et de réaliser un suivi spatio-temporel d'apports de nappe importants.

La mesure par fibre optique (Fiber Optique – Distributed Temperature Sensing) consiste à déployer une fibre en fond de lit de rivière. La température est mesurée tout le long de la fibre à une résolution de 1m et une précision de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}^3$. Dans cette expérience, la fibre optique a été déployée en zigzag afin de couvrir les deux rives et le milieu du lit (thalweg). Ainsi, le tronçon instrumenté faisait 150m de long pour une longueur totale de fibre déployée de 450m.

Une fois les lieux d'apports de nappe identifiés, la mesure par MOLONARI a permis de suivre les échanges nappe-rivière de manière plus précise. Ce dispositif a été développé par Cucchi et al.⁴ sous la direction d'A. Rivière du laboratoire Géosciences des Mines à Fontainebleau. Ce dispositif comporte deux mesures essentiellement : une canne de mesure de températures verticales (ici 4 profondeurs allant de -10cm à -40cm) et une mesure de pression différentielle entre la nappe et la rivière. Un modèle permet ensuite de traiter les données et de calculer des flux verticaux d'échanges de chaleur au fil du temps (modèle GINETTE⁵). Cet article se concentre sur les étapes d'identification des apports de nappe.

A. Localisation d'anomalies thermiques

La localisation d'apports de nappe consiste dans un premier temps à localiser leur signature thermique. Une « anomalie thermique » est un signal thermique qui présente des variations thermiques différentes du reste du cours d'eau. En particulier, concernant les apports de nappe souterrains, il s'agit généralement d'un signal plus chaud en hiver et plus froid en été. En effet, la température de la nappe étant constante tout au long de l'année, un apport de nappe tendra à des variations contrastées par rapport à de l'eau de rivière majoritairement conditionnée par le forçage atmosphérique.

Les mesures de la fibre optique permettent d'obtenir un signal spatio-temporel (en 2D) hautement résolu. La figure 1 montre une carte de résolution spatiale de 1m sur un pas de temps moyen de 30min, l'évolution de la température sur un tronçon de la Touques (Fig. 1).

¹ Beaufort et al., « Influence of Landscape and Hydrological Factors on Stream–Air Temperature Relationships at Regional Scale ».

² Le Lay et al., « Characterization of Diffuse Groundwater Inflows into Streamwater (Part I) ».

³ Le Lay et al., « Characterization of Diffuse Groundwater Inflows into Stream Water (Part II) ».

⁴ Cucchi et al., « LOMOS-Mini ».

⁵ Cucchi et al., « Estimating Hydrothermal Properties and High-Frequency Fluxes From Geophysical Measurements in the Hyporheic Zone ».

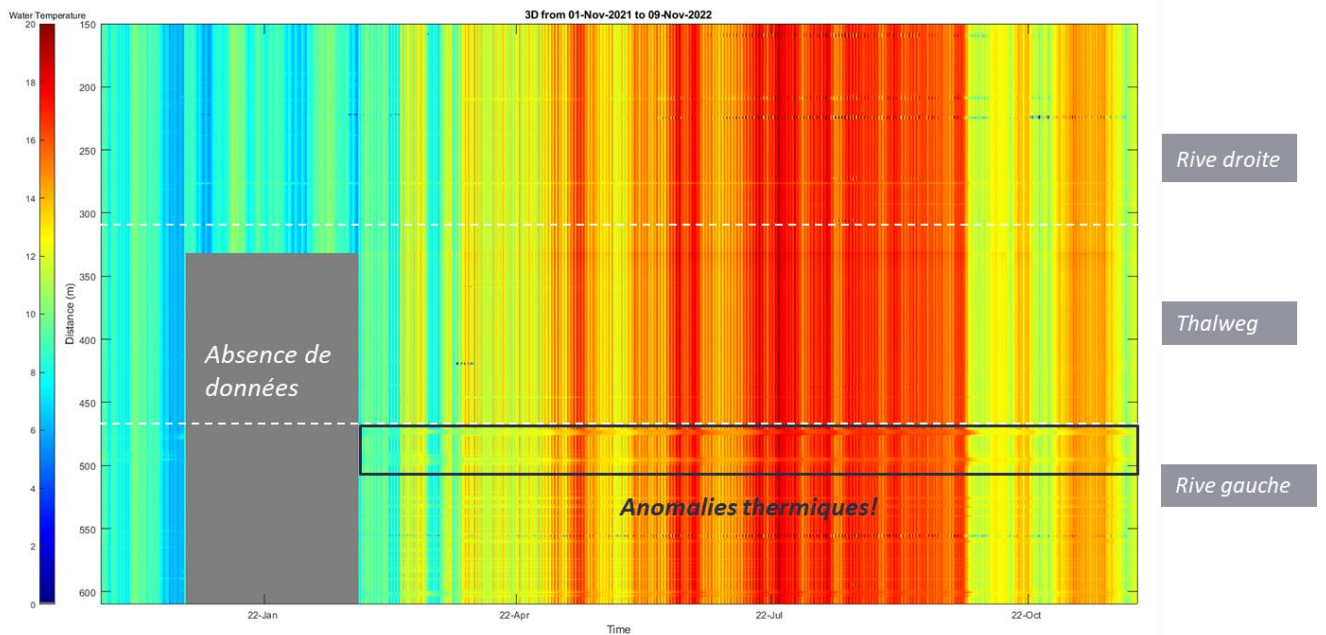


Figure 1: Carte 2D de la température de la Touques mesurée par fibre optique.

Naturellement, la figure met en évidence la saisonnalité du signal avec une température plus élevée en été (de Mai à Septembre) et plus froide en hiver (de Novembre à Mars). Aux intersaisons, les variations sont très importantes et se maintiennent sur des périodes allant de quelques jours à quelques semaines. Sur les trois portions de rivière (rive droite, thalweg, rive gauche), la température est relativement continue et identique. Dans un second temps, deux différences majeures apparaissent:

- En rive droite, plusieurs zones comportent des variations extrêmes (températures minimales proches de 0°C et maximales supérieures à 20°C).
- En rive gauche, plusieurs zones comportent des variations différentes et constantes sur toute l'année. Cela se traduit sur le graphique par des lignes de colorations plus homogènes. Deux d'entre elles sont encadrées en noir.

La première différence provient d'endroits où la fibre s'est retrouvée émergée et a donc mesurée la température de l'air, d'où la grande amplitude de ces variations. La seconde différence, en revanche, correspond à ce qui a été défini comme anomalie thermique. En effet, ces lignes sont colorées différemment car la variation de température à cet endroit est de moindre amplitude. La corrélation entre la température de l'eau moyenne sur l'année et la température de l'air moyenne sur l'année (Fig. 2) permet de confirmer et localiser précisément ces anomalies thermiques. Cette dernière est obtenue à partir d'une portion de fibre à l'air libre entre le local du boîtier de mesure et l'entrée dans la rivière.

A nouveau, aux endroits de plus forte variation, la corrélation entre la température de l'eau et la température de l'air est forte (>0.8), ce qui confirme l'hypothèse de la fibre émergée. A l'inverse, aux endroits d'anomalies thermiques, cette corrélation baisse à près de 0.5. A ces endroits, un autre facteur majoritaire influence donc le régime thermique de la rivière.

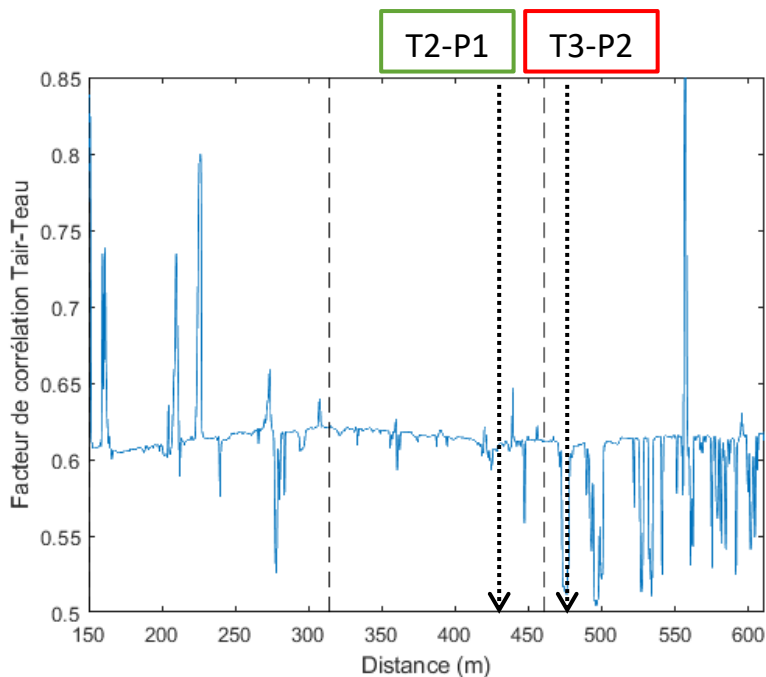


Figure 2: Corrélation entre la température de l'air et la température de l'eau le long de la fibre.

Suite à ces observations, des dispositifs MOLONARI ont été installés afin de mesurer des variations thermiques en profondeur ainsi que la pression différentielle entre la rivière et la nappe. Les premières mesures permettent de suivre les échanges thermiques entre les deux milieux tandis que la deuxième renseigne directement sur les mouvements d'eau.

B. Identification d'apports de nappe

Développé par Cucchi et al. (2017) sous la direction d'A. RIVIERE, les dispositifs MOLONARI permettent, à partir de mesures simples, de calculer des flux d'échanges thermiques verticaux entre la nappe et la rivière. Sur le tronçon de la Touques, plusieurs dispositifs ont été installés. Certains ont été placés aux endroits d'anomalies thermiques et d'autres sur des endroits sans anomalie afin de servir de référence. Dans cet article, les mesures de deux de ces dispositifs sont présentées: T2 placé comme référence et T3 placé sur une anomalie en rive gauche (Fig. 2).

Sur les dispositifs installés, les mesures de température verticale comportaient 4 thermocouples placés de 10cm à 40cm de profondeur dans le lit de la rivière. Une période de crue en Avril 2022 permet d'illustrer la différence de régime thermique entre les deux sites. Sur cette rivière, les crues peuvent être très importantes (passage de 15cm à plus d'1m de tirant d'eau en quelques heures) mais sont très rapidement amorties (en un jour maximum). La perturbation est donc très brève et de grande amplitude. Grâce à cette perturbation, il est possible de mesurer la vitesse à laquelle la température revient au régime d'avant crue (Fig. 3).

Plus précisément, c'est la durée entre le premier creux post crue et le premier pic qui suit qui est mesurée. Ainsi, une différence de 4h entre le signal de référence (en vert) sur le site T2 et le signal d'anomalie (en rouge) sur le site T3 pour les thermocouples situés à 10cm de profondeur a pu être observée. Pour les thermocouples situés à 40cm de profondeur, cette différence augmente à 6h. A l'endroit de l'anomalie (T3), la température reste plus froide plus longtemps tandis que sur le site de référence (T2), elle revient plus rapidement sur le régime imposé par le forçage atmosphérique.

Par ailleurs, sur la Fig. 3, à 40cm de profondeur, avant la crue, la température de T3 (en rouge) est notablement inférieure à celle de T2 (en vert). Après la crue, les deux températures se rejoignent, ce qui peut s'expliquer par la pression de la rivière plus importante jusqu'à l'amortissement de la crue. A 10cm de profondeur, la température en T3 est plus élevée qu'en T2 après la crue. Cette température est néanmoins rapidement amortie dès 40cm, signe d'un apport d'eau de température plus fraîche qui vient tamponner la montée en température en profondeur.

Enfin, les mesures de pression différentielle finissent de valider l'hypothèse d'un apport de nappe au niveau du site d'anomalie T3 (Fig. 4). En effet, les mesures de pression des deux sites (T2 et T3 se différencient par une inversion de signe. Sur la Fig. 4, les hauteurs d'eau

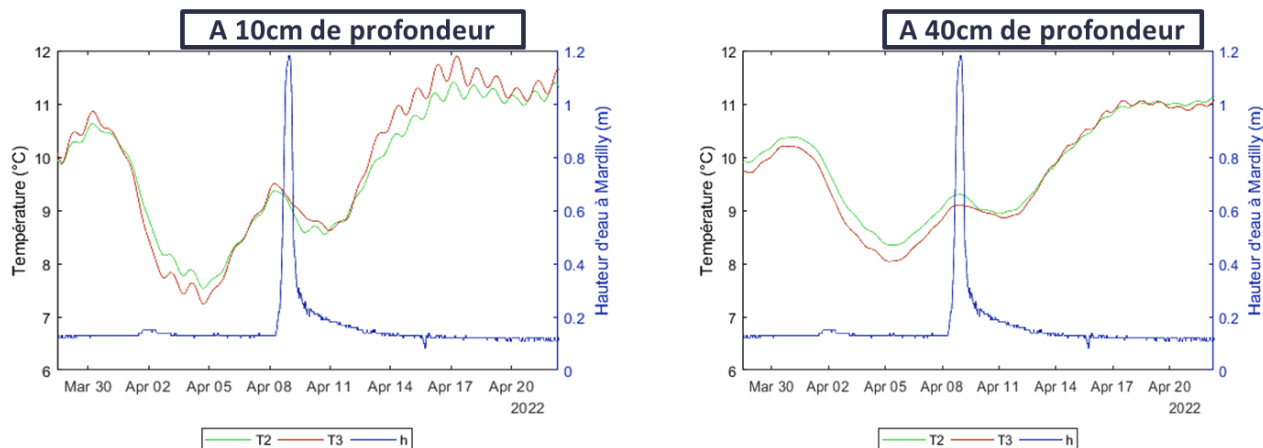


Figure 3: Comparaison d'évolution de la température à -10cm et à -40cm suite au passage d'une crue sur les sites T2 (vert) et T3 (rouge).

équivalentes ont été calculées à partir des valeurs de tension du capteur de pression. Ainsi, des valeurs positives témoignent d'une pression plus importante de la rivière vers la nappe tandis que des valeurs négatives témoignent d'une pression côté nappe plus importante.

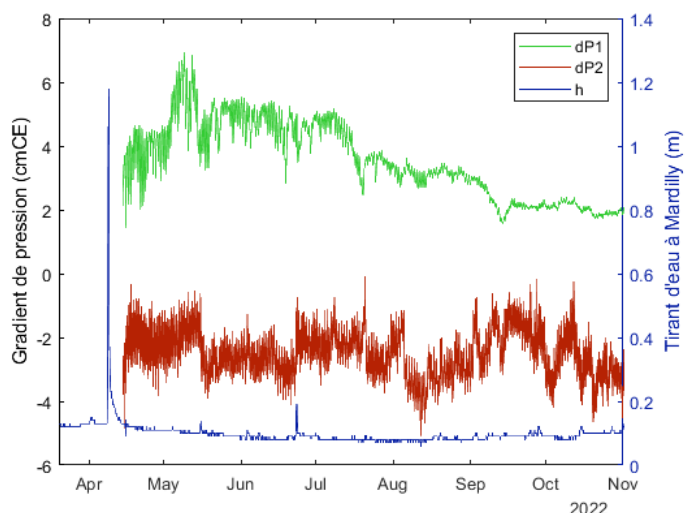


Figure 4: Gradient de pression sur les sites T2 (vert) et T3 (rouge).

flux d'échanges thermiques fait désormais sens sur ces données et plusieurs d'entre eux seront comparés dans la suite de ce travail (modèles GINETTE, Vflux, 1DTempPro). En complément, la correspondance entre la localisation des apports de nappe identifiés et la géologie environnante⁶ permettra d'identifier des sites le long de la Touques qui seraient favorables à ce régime thermique. Enfin, le changement climatique affectant de manière non négligeable l'évolution de la température des cours d'eau, prédire l'évolution de ces refuges thermiques deviendra fondamental pour le suivi des espèces thermosensibles.

Remerciements :

Ce travail est le fruit de plusieurs collaborations nationales. Les auteurs remercient tout d'abord l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et son interlocuteur, Florent GUIBERT, pour le financement du projet QUAE.

Les auteurs tiennent également à remercier les concepteurs des dispositifs MOLONARI pour leur aide et la formation sur leurs outils ainsi que sur le modèle GINETTE, en particulier Agnès RIVIERE et Gerlus DZABA MALOUNGA.

Conclusion

Cet article présente l'utilisation combinée de la mesure par fibre optique et de dispositifs MOLONARI afin d'identifier des localisations d'apports d'eau de nappe. Pour cela, une première cartographie spatio-temporelle a permis de localiser des zones d'anomalies thermiques constantes dans le temps et dans lesquelles la température varie avec une plus faible amplitude. Ensuite, les mesures de températures verticales et de pression différentielle ont permis de confirmer que ces anomalies thermiques correspondent à des apports de nappe dans la rivière.

L'utilisation de modèles de calculs de

⁶ Gresselin et al., « Use of Statistical Methods to Characterize the Influence of Groundwater on the Thermal Regime of Rivers in Normandy, France ».

Le suivi expérimental a pu bénéficier du soutien de la population locale et en particulier de la mairie de Mardilly qui a mis à disposition un local sécurisé pour le matériel de mesure. Les habitants de la commune ont également montré leur intérêt pour les résultats et le devenir de leur environnement. Merci à M. Alain GOURIO.

Enfin, les auteurs remercient chaleureusement les appuis techniques de l'unité UMR SAS, en particulier Pascal PICHELIN et les membres du pôle ANATER.