

Colloque
"Gestion des eaux souterraines"
Bordeaux - 2023

Article étendu

Titre
<i>L'apport des statistiques dans l'identification de l'influence des eaux souterraines dans le régime thermique de rivières en Normandie. L'exemple de la Touques</i>
Nom des auteurs
<i>Nelly MOULIN ⁽¹⁾ ; Frédéric GRESSELIN ⁽²⁾ ; François KAUFFMANN ⁽³⁾, Hugo LE LAY⁽¹⁾, Bruno DARDAILLON⁽²⁾ et Zahra THOMAS⁽¹⁾</i>
Affiliation
<i>(1) Institut Agro Rennes-Angers, UMR 1069 SAS (2) DREAL Normandie (3) LMNO, UMR 6139, Université de Caen-Normandie</i>

La température : un paramètre clef de l'écologie des cours d'eau

La température est un paramètre essentiel de l'écologie des cours d'eau. Elle agit sur la croissance et la reproduction des espèces et sur la concentration en oxygène dissous de l'eau. En France, le suivi patrimonial de la température des cours d'eau a été confié à l'Office Français de la Biodiversité (OFB) par le Ministère de l'Environnement. En Normandie, la Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DREAL) et la fédération de pêche de l'Eure ont installé un réseau thermique complémentaire. Ces suivis ont pour objectif une meilleure compréhension du fonctionnement écologique des rivières et la qualification de leur état d'altération. Les données produites contribuent à comprendre également les facteurs de contrôle de la température des cours d'eau et les effets du changement climatique. La température des rivières normandes s'élève d'environ 0,1°C par an actuellement (Fig. 1).

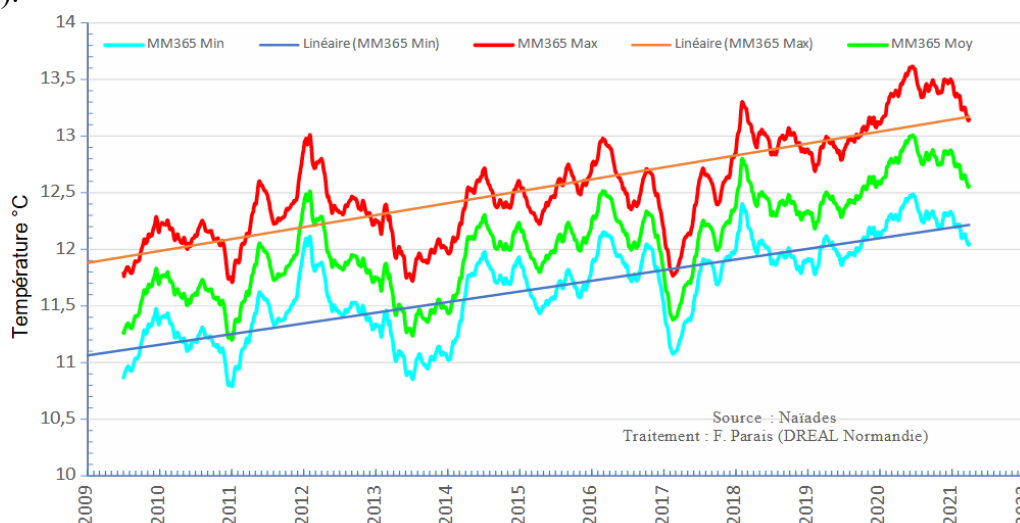


Fig. 1. Evolution de la moyenne mobile 365 jours d'une rivière normande (l'Orne à Serans).

Le régime thermique des cours d'eau : de multiples facteurs de contrôle

Les principaux facteurs de contrôle de la température des rivières sont climatiques. La température de l'air, l'intensité et la durée d'exposition au rayonnement solaire expliquent l'essentiel des variations de température des cours d'eau (Beaufort et al., 2016 ; Beaufort et al., 2019). Ces variations dépendent aussi de caractéristiques propres à chaque hydrosystème (débit et vitesse d'écoulement, distance à la source...) ainsi qu'à ses conditions d'aménagement (densité de la ripisylve, présence de retenues...). Le rôle de la ripisylve (Moulin et al., 2022) et des barrages (Seyedhashemi et al., 2021, Moulin et al., 2022) est de mieux en mieux documenté. Les apports en eau souterraine jouent également un rôle dans la thermie des cours d'eau. En été, la température des eaux de nappe est en effet plus fraîche que celle des cours d'eau, au contraire de l'hiver. En Normandie, selon les caractéristiques aquifères des bassins versants, des différences de température significatives s'observent hiver comme été entre rivières de taille comparable, comme le Vingt-Bec et la Croix-Blanche (Fig. 2). Les cours d'eau drainant les grands aquifères crayeux de l'Est de la région, telle la Croix-Blanche, ont les régimes thermiques les plus tamponnés.

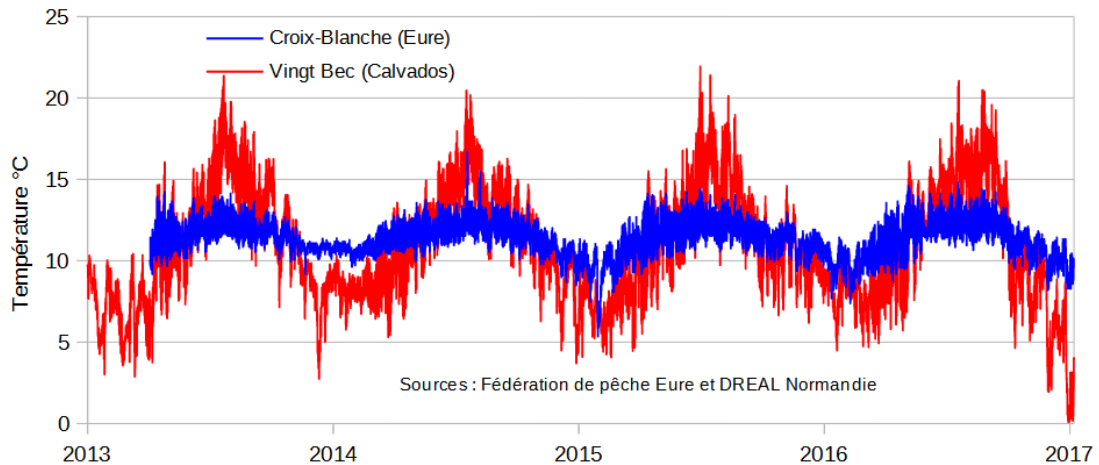


Fig. 2. Comparaison entre les températures de la Croix-Blanche (Eure, craie du Crétacé) et du Vingt-Bec (Calvados, aquifères du socle armoricain).

Le diagnostic du rôle des eaux souterraines

L'influence des eaux souterraines sur la température d'une rivière est d'autant plus forte que les apports aquifères sont élevés (fort débit de base) et que la distance à la source est faible. La température du cours d'eau tend alors vers celle de l'eau souterraine (11-12°C en Normandie), comme pour la Croix-Blanche (Fig. 2). L'étude de la corrélation entre la température de l'air (T_a) et de l'eau ($T_w = T_{water}$) est la méthode la plus utilisée pour identifier l'influence d'eaux souterraines sur la thermie d'un cours d'eau (O'Driscoll et DeWalle, 2006, Beaufort, 2015). Des approches basées sur l'hydrodynamique, la géochimie ou la biodiversité permettent également de mettre en évidence l'influence des eaux souterraines dans l'écologie d'une rivière. Elles sont synthétisées dans deux guides (Paran et al., 2015 ; Paran et al., 2017).

L'influence thermique des eaux souterraines est progressivement masquée vers l'aval par l'augmentation des échanges de chaleur entre l'eau et l'atmosphère. L'estompage de cette signature se fait d'autant plus rapidement que le débit de base et la vitesse d'écoulement de la rivière sont faibles et que celle-ci s'avère large et sans ombrage. L'identification du signal généré par les eaux souterraines peut devenir dans ce cas complexe.

Améliorer le diagnostic loin des sources

Nous proposons une méthode permettant d'affiner le diagnostic vers l'aval. Elle repose sur le couplage de deux méthodes statistiques : l'ACI (analyse en composante indépendante) et l'ACP (analyse en composante principale). Elle a été mise au point dans le bassin de la Touques (Gresselin et al., 2021).

La méthode requiert des séries temporelles de T_w , de débit et climatiques distribuées d'amont en aval du bassin. Le bassin de la Touques est équipé de 4 stations thermiques et de 4 stations hydrométriques (Fig. 3). Les données climatiques ont été extraites des modèles SAFRAN de Météo-France.

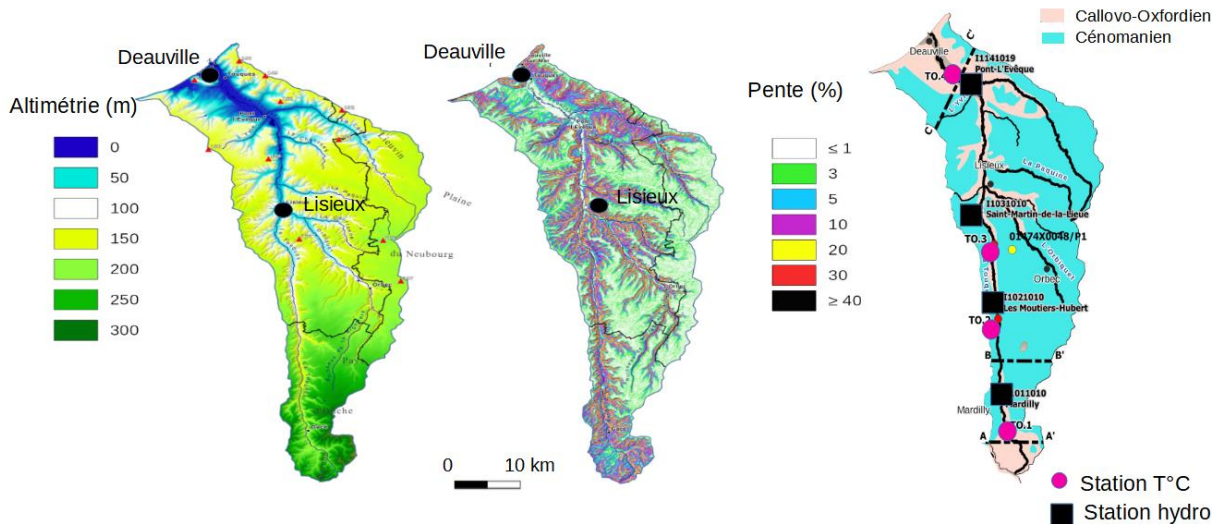


Fig. 3. Relief, pente et géologie du bassin versant de la Touques avec localisation des sites de suivi thermique et hydrométrique

Les traitements statistiques réalisés ont été menés grâce aux logiciels libres OpenOffice et R et aux packages pour R, Fast-ICA (Hyvärinen & Oja 1997 ; Marchini et al., 2021).

Les traitements par ACI ont porté sur les chroniques de différence de température entre l'eau et l'air ($T_w - T_a$), au nombre de quatre (To1, To2, To3 et To4). Deux signaux dénommés C1 et C2 ont été produits (fig. 4).

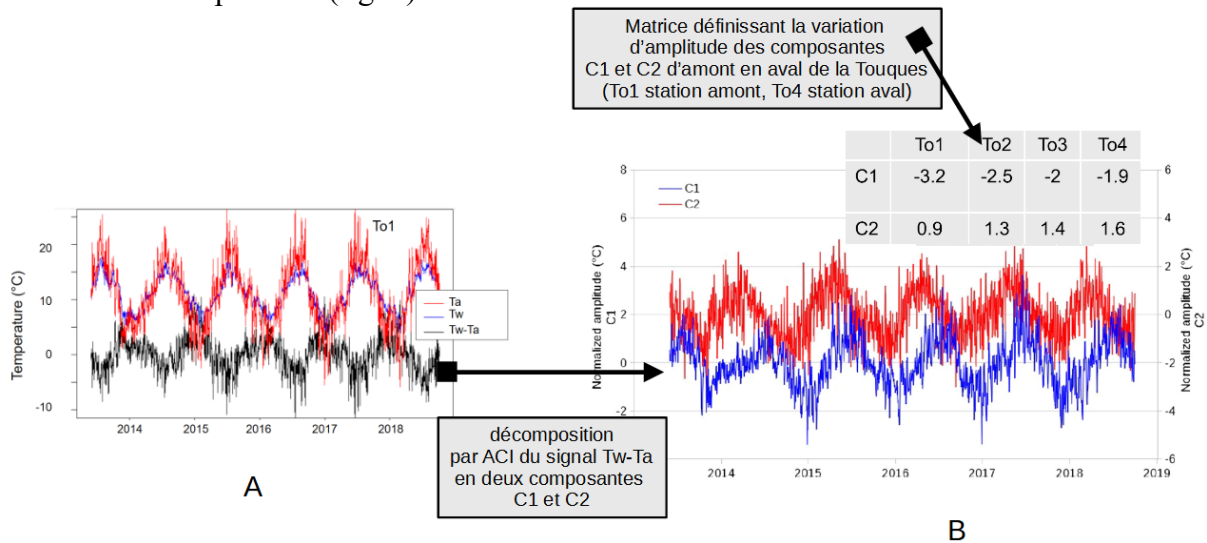


Fig. 4. Processus de traitement des données par ACI. A : pour chaque station de mesure de la température de l'eau, calcul de la différence entre T_w et T_a (données bi-horaires). B : décomposition des quatre chroniques de $T_w - T_a$ en deux signaux synthétiques (C1 et C2). Les courbes illustrent la variation du signal dans le temps. Le tableau est une matrice de passage qui permet de quantifier la variation d'amplitude du signal de station en station.

Les signaux C1 et C2 sont cycliques et déphasés. L'amplitude de C1 décroît d'amont en aval. Celle de C2 augmente vers l'aval, conformément au débit de base du cours d'eau (Fig. 5). C2 tend à réchauffer le cours d'eau de janvier à mars, période de recharge des aquifères, puis à le refroidir de l'été à l'automne.

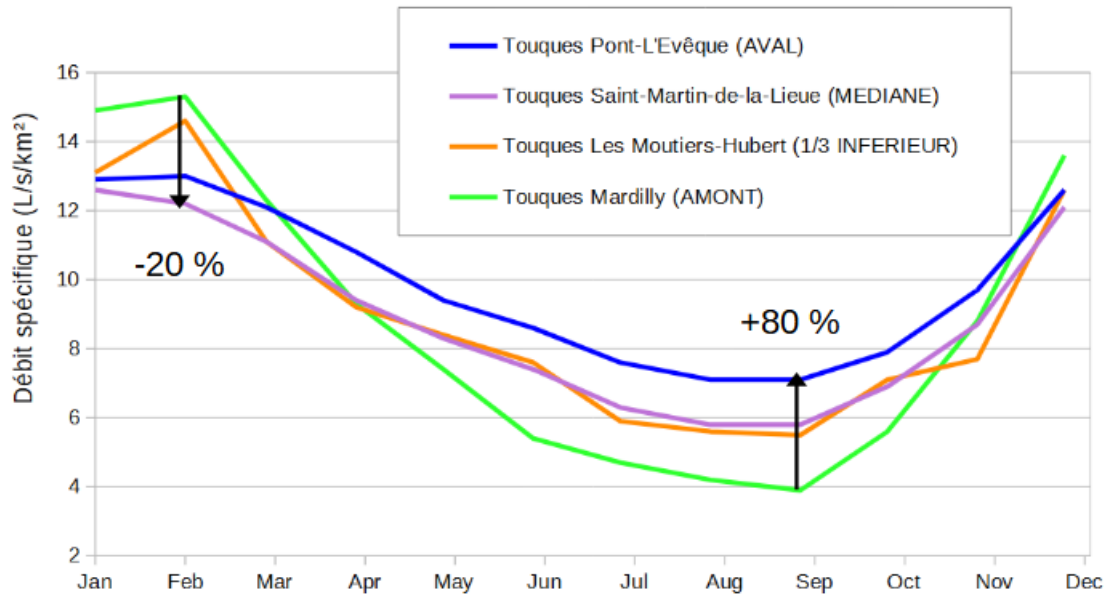


Fig 5. Evolution amont aval du débit spécifique de la Touques (source DREAL).

Ces signaux ont été intégrés dans l'ACP en tant que variables actives, au même titre que les chroniques de température de l'air, de l'eau et de différence $T_w - T_a$ (D), soit 5 variables actives par station T_w .

6 chroniques de variables supplémentaires sont représentées en tant que repère hydrologique. Il s'agit du débit de base de la Touques (BF) ; de son débit de ruissellement (RO) ; du baseflow index (BFI), du rayonnement solaire (SSI) ; de la piézométrie de la nappe de la craie (P) et de l'évapo-transpiration (ER).

Les séparations d'écoulement ont été faites selon la méthode du base flow index (Nathan et McMahon 1990).

Résultats et interprétation

Les deux axes principaux de l'ACP représentent l'essentiel de l'inertie totale de l'information (entre 90 et 95 % selon les stations). L'axe principal est fixé par T_a et T_w ainsi que par D et C1. C2 fixe l'axe 2 (Fig. 6).

T_a et T_w sont liés et opposés à D.

D'amont en aval, T_w tend vers SSI. Le rayonnement solaire semble agir de plus en plus sur la température de la Touques au fur et à mesure que le temps de transit de l'eau augmente et que la rivière s'élargit.

L'ACP établit un lien entre C1 et le débit de ruissellement de la Touques. Elle relie C2 au débit de base du cours d'eau et à la piézométrie. C1 et C2 semblent ainsi représenter deux facteurs de contrôle liés au débit de la Touques, respectivement le ruissellement et le débit de base, ce dernier étant relié aux eaux souterraines.

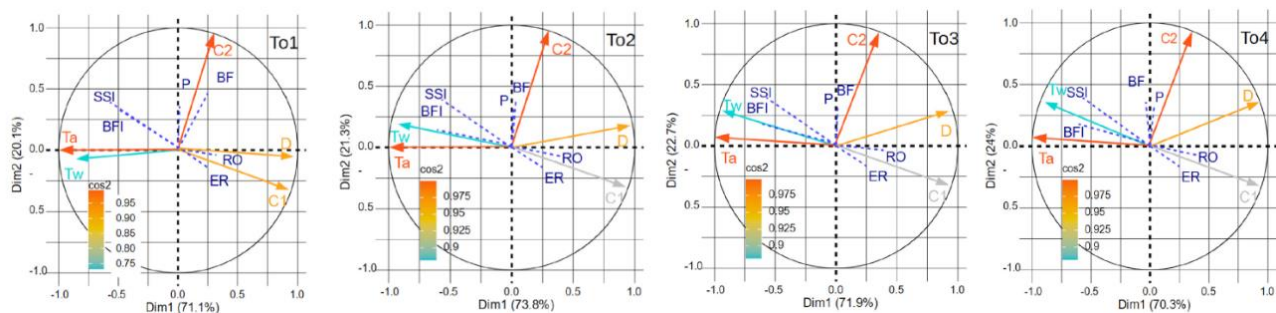


Fig. 6. Résultats de l'ACP pour les stations de la Touques

D'amont en aval, D s'éloigne progressivement de C1 (ruissellement) et glisse vers C2 (eau souterraine). L'influence des eaux souterraines sur la température du cours d'eau est plus forte en aval qu'en amont, à l'inverse du ruissellement. Ceci est cohérent avec la physiographie et l'hydrologie du bassin, ainsi qu'avec la matrice de l'ACI. L'étude de la corrélation entre Ta et Tw seule ne permet pas de mettre en évidence cette influence croissante.

Conclusions

L'ACI et l'ACP permettent de mettre en évidence le rôle des eaux souterraines dans le régime thermique de la Touques. Cette influence croît d'amont en aval, en lien avec la traversée par la Touques d'un plateau crayeux très aquifère. Le rôle des eaux souterraines intervient via la température de ces dernières (autour de 11°C) mais aussi de leur contribution au débit du cours d'eau. L'ACI permet de mettre en évidence les variations saisonnières de cette influence : réchauffement ou refroidissement de la rivière selon les périodes de l'année. Le rôle des eaux souterraines est faible en fin de printemps et en automne, période pendant laquelle la température de l'air avoisine celle des eaux souterraines (autour de 11°C). Peu utilisée en hydrologie, l'ACI se révèle être une méthode efficace pour étudier les facteurs de contrôle de processus hydrologiques. Elle a permis récemment de démontrer l'influence de la ripisylve sur la thermie de la rivière Odon et celui du barrage de Vezins et de son démantèlement sur le régime thermique de la Sélune (Moulin et al., 2022).

Beaufort A., 2015. Modélisation physique de la température des cours d'eau à l'échelle régionale : application au bassin versant de la Loire. Thèse, 263 p., Université de Tours, France.

Beaufort, A., Moatar, F., Curie, F., Ducharne, A., Bustillo, V. & Thiery D. 2016. River temperature modelling by Strahler order at the regional scale in the Loire river basin, France. *River Res. Applic.*, 32, 597-609.

Beaufort, A. Moatar, F., Sauquet, E., Loicq, P. & Hannah, D.M. 2019. Influence of landscape and hydrological factors on stream–air temperature relationships at regional scale, *Hydrological Processes*, 34, 3, 583-597.

Gresselin, F., Dardaillon D., Bordier C., Parais F. et Kauffmann F., 2021. Use of statistical methods to characterize the influence of groundwater on the thermal regime of rivers in Normandy, France: comparison between the highly permeable, chalk catchment of the Touques River and the low permeability, crystalline rock catchment of the Orne River". In: Geological Society, London, Special Publications, SP517–2020–117. issn: 0305-8719, 2041-4927. <https://doi.org/10.1144/SP517-2020-117>

Hyvärinen, A. and Oja E., 2000. "Independent component analysis: algorithms and applications. In: *Neural Networks* 13.4, pp. 411–430. issn: 08936080. doi: [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(00\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(00)00026-5)

Nathan, R.J. and McMahon, T.A. (1990) Evaluation of Automated Techniques for Base Flow and Recession Analyses. *Water Resources Research*, 26, 1465-1473.

Marchini, J. L., C. Heaton, and B. D. Ripley (Sept. 25, 2021). Package 'fastICA'

Moulin N., Gresselin F., Dardaillon B et Thomas Z., 2022. River temperature analysis with a new way of using Independent Component Analysis. *Front. Earth Sci.* Volume 10 - 2022 | <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1033673>

O'Driscoll, M.A. and DeWalle, D.R. 2006. Stream–air temperature relations to classify stream-ground water interactions in a karst setting, central Pennsylvania, USA *Journal of Hydrology*, 329, 140–153, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.010>

Paran F., Arthaud F., Novel M., Graillot D., Bornette G., Piscart C., Marmonier P., Lavastre V., Travi Y. et Cadilhac L., 2015. Caractérisation des échanges nappes/rivières en milieu alluvionnaire. Guide méthodologique, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (AERMC) et Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR).

Paran F., Graillot D., Arthaud F., Bornette G., Chatelier M., Douez O., Flipo N., Habets F., Lavastre V., Marmonier P., Mouhri A., Piégay H., Piscart C., Simon L., Tallec G., Vergnes J.-P., Wawrzyniak V., Maugis P. et Augéard B., 2017. Guide méthodologique Interactions nappe/rivière. Des outils pour comprendre et mesurer les échanges. Agence Française pour la Biodiversité (OFB), Ministère de l'Environnement, Armines et Zones ateliers LTER France.

Syedhashemi, H., Moatar F., Vidal J., Diamond, Beaufort A., Chandesris A et Valette L., 2021. "Thermal signatures identify the influence of dams and ponds on stream temperature at the regional scale". In: *Science of The Total Environment* 766, p.142667. ISSN : 00489697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142667>