



ÉCOLOGIE

L'une des fonctions de la commission environnement de la Fédération Française des Associations de sauvegarde des Moulins est de répondre à certaines attaques se réclamant d'arguments techniques.

La Direction de l'Eau et de la Biodiversité déclare qu'il est scientifiquement prouvé que les retenues des moulins réchauffent l'eau des rivières. Nous publions ici une revue de bibliographie scientifique servant actuellement de document de travail aux travaux de notre commission.

Travaux de la Commission Environnement FFAM

Les moulins font-ils de la température ?

Par Michel Veille

Association Moulins de Charente

1. Introduction

Certains prétendent que "les moulins réchauffent l'eau" et nuisent aux poissons. Ils disent s'appuyer sur des "preuves scientifiques". Evidemment, ceci est ridicule. De telles preuves n'existent pas, mais même si l'on voit la portée démagogique de ces affirmations, il est utile de leur répondre et de se poser la question d'un effet environnemental éventuel des moulins.

Une première ambiguïté vient du fait que la catégorie "moulin" est absente de la littérature scientifique, car un physicien ne peut pas définir "le moulin" comme un concept intangible. Il y a des dizaines de types de moulins, et des dizaines de types de retenues de moulins. Les retenues sur lesquelles travaillent les chercheurs en sciences de l'environnement sont des ouvrages de grande taille aux caractéristiques physiques suffisamment répétitives pour permettre des statistiques. A cette échelle, ils mettent en évidence des différences entre retenues, avec parfois des effets opposés sur les cours d'eau, et l'on peut se poser la question de ce qu'il en advient à l'échelle d'ouvrages plus petits et disparates comme les retenues des moulins. La synthèse ci-après s'appuie sur des travaux récents pour donner un aperçu du dossier scientifique, sachant que les connaissances actuelles comportent encore beaucoup d'inconnues.

2. Les facteurs qui agissent sur la température des cours d'eau

Un cours d'eau ne crée pas de chaleur. C'est un fluide, parfois stratifié, doté d'une inertie thermique et susceptible d'échanger de la chaleur avec diverses sources. Les facteurs qui agissent sur la température d'un cours d'eau sont :

(1) La température de la nappe. A faible profondeur, la nappe phréatique de nos régions est fraîche en toute saison. C'est la température de l'eau à sa source. La nappe continue d'influencer la rivière le long de son parcours. Il faut se rappeler qu'elle s'écoule sur une strate humide. Quand un substrat poreux (l'« aquifère ») est à sec, la rivière se dessèche aussi.

(2) La température de l'air. L'échange est intense entre les deux fluides que sont l'air et l'eau. Plus la rivière se rapproche de son embouchure, plus sa température est influencée par celle de l'air.

(3) L'ensoleillement. L'insolation est source de chaleur. Son effet est contrecarré par les arbres des rives, qui forment la "ripisylve". A noter qu'une partie du spectre solaire est réfléchi, comme l'on peut le constater quand on regarde un paysage depuis un avion.

(4) La vitesse d'écoulement. On oppose les milieux "lentiques" (à écoulement lent, de type étang) aux milieux "lotiques" (à

écoulement rapide, de type torrent). Le temps de séjour de l'eau dans un segment de son cours influence son équilibre thermique avec les différents facteurs. En amont d'une retenue, les couches superficielles d'une rivière sont surtout influencées par l'air et l'ensoleillement, tandis que les couches profondes sont surtout influencées par la nappe.

(5) Les usines. Tout moteur thermique est basé sur l'écart de température entre deux sources. Il est donc dans la nature même des centrales thermiques et nucléaires d'évacuer de la chaleur. C'est pourquoi beaucoup de ces usines sont installées près des rivières.

(6) Les changements climatiques. Actuellement, le déplacement des zones climatiques produit, dans nos régions, un lent mouvement des températures moyennes vers le nord, ainsi que des changements dans les caractéristiques climatiques des saisons. La phénologie reproductive des organismes aquatiques en est un indicateur fiable et sensible.

3. Température de l'air et température de la nappe

Pendant des années le programme PIREN-Seine a constitué une base de données sur le bassin de la Seine, depuis les sources jusqu'à l'embouchure. Dans un bilan des peuplements de poissons, Belliard et collaborateurs (2010) comparent

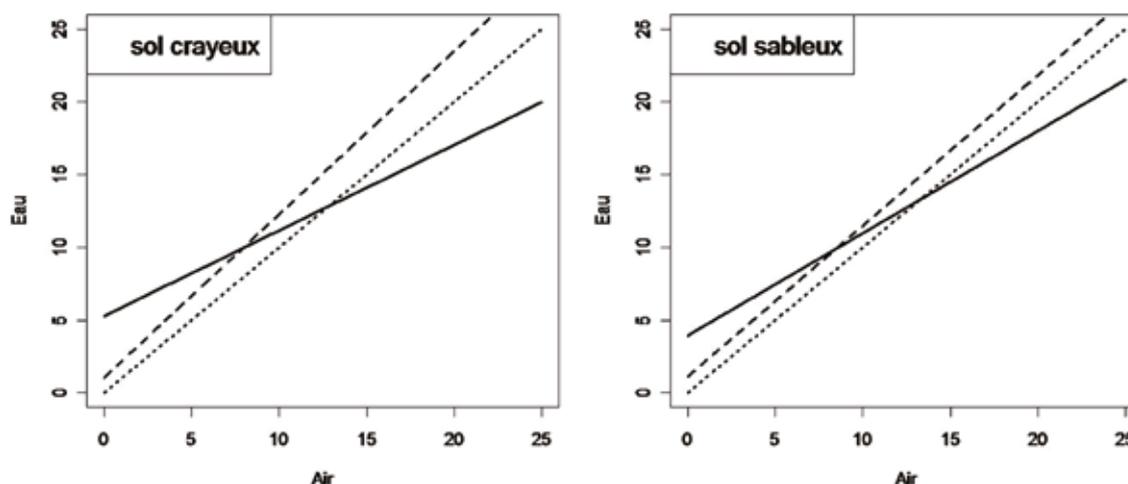


Figure 1. Relation entre la température de l'eau et la température de l'air ; en pointillés : la bissectrice (ligne où la température des deux milieux est égale); droite continue : bassins d'amont (bassins versants de taille inférieure à 100 km²); droite en tireté : bassins d'aval (bassins versants de taille supérieure à 10.000 km²) ; on a omis les valeurs des bassins intermédiaires (Bélliard et coll. 2010).

l'évolution des températures moyennes de l'eau et de l'air au cours des fluctuations annuelles. Sur les différents types de substrats (calcaire, crayeux, sableux, etc.), la tendance est la même: en amont, c'est-à-dire près des sources (droites continues sur la figure 1), la température de l'eau est moins extrême que celle de l'air: en été, la rivière est plus froide que l'air ; et en hiver, elle est plus chaude que l'air. Cette différence est d'autant plus marquée que le substrat est poreux. Par contraste, en aval (droites en tireté sur la figure 1), la température de la rivière s'équilibre avec celle de l'air. Elle devient parallèle et presque égale à elle tout au long de l'année. Ces différences viennent du fait qu'en amont, la température des cours d'eau est influencée par celle de la nappe souterraine, tandis qu'en aval, elle tend à s'équilibrer avec celle de l'atmosphère. C'est un trait commun à toutes les rivières (Figure 1).

On remarque que dans les différents cas de figure, la température de l'eau en aval est certes parallèle à celle de l'air, mais qu'elle lui est supérieure d'environ 1 degré (nous ne montrons que deux milieux, mais la tendance est la même dans tous les autres). Cela pourrait surprendre, car si c'était simplement l'air qui chauffait l'eau, la température de l'eau devrait plutôt être inférieure ou égale à celle de l'air. En fait, cette différence de 1°C reflète probablement le réchauffement de l'eau par l'insolation. Ces figures montrent donc un équilibre entre trois sources thermiques: aérienne, solaire et géologique.

Le facteur qui pourrait nous inquiéter dans ce schéma, est le rôle de la température de la nappe. Car le changement climatique ne pourra qu'atténuer son rôle tampon dans la régulation de la température de l'eau des petites rivières situées en amont des bassins versants. Cela risque d'affecter à terme la température des cours d'eau. Actuellement, les aquifères tendent à

se vider de leur eau du fait de l'intensité des sécheresses d'été, et jusqu'à présent, le maintien de l'activité agricole la portait à répondre aux épisodes de sécheresse en augmentant les prélèvements dans la nappe. La tendance prônée aujourd'hui est de favoriser des productions agricoles moins exigeantes en eau.

4. L'absence des grands cours d'eau des données scientifiques

Les phénomènes vus précédemment expliquent pourquoi l'on ne trouve pas d'étude scientifique sur l'altération du régime de température des fleuves ou des rivières de quelque importance. Comme le dit sans détour le rapport Le Treut sur la Nouvelle Aquitaine¹ :

"La température des grands cours d'eau est essentiellement contrôlée par les conditions atmosphériques alors que celle des petits et moyens cours d'eau peut dépendre des conditions géographiques et géomorphologiques au niveau de la station de mesure et en amont de celle-ci (p. 128)"

Tel est aussi l'avis de l'étude récente des laboratoires INRAE de Lyon et de l'université de Tours (Seyedhashemi et coll. 2021), qui cherchent la signature des effets anthropiques sur les cours d'eau, et qui déclarent en commençant leur étude:

"Nous avons sélectionné des stations susceptibles d'être influencées par des structures anthropogéniques. Ceci élimine de fait les grands fleuves de notre jeu de données, car ils sont peu sensibles aux altérations de régime thermique du fait de leurs plus grands volumes circulants et de leur plus grande capacité thermique (Smith and Lavis, 1975; Webb and Walling, 1993; Caissie, 2006; Kelleher et al., 2012). De plus, vu que les températures des fleuves sont en équilibre approximatif avec la température de l'air (Moatar and Gailhard, 2006; Bustillo

et al., 2014), l'information obtenue par des analyses de type régression est équivoque. Par conséquent, [notre] étude se centre sur l'altération du régime des petites rivières."

On voit que l'équilibre thermique des fleuves et grandes rivières avec l'atmosphère est depuis longtemps un lieu commun qui ne se discute plus pour les laboratoires d'audience internationale.

5. Influence de la structure des retenues

Cette étude de Seyedhashemi et coll. (2021) est intéressante à plus d'un titre. D'abord parce qu'elle se base sur l'état le plus récent de la bibliographie scientifique. Ensuite parce qu'elle nous donne une idée des difficultés qu'affrontent actuellement les chercheurs payés sur les fonds publics pour travailler à plein-temps à améliorer nos connaissances. Or, la sagesse consiste à reconnaître ce que la science peut dire à ce jour, et ce qu'elle ignore encore.

Les auteurs en font une première étape de la recherche d'un indicateur mesurable de l'impact des ouvrages sur les cours d'eau à partir d'une étude couvrant l'ensemble du bassin versant de la Loire et de ses affluents. Pour cela, ils divisent les ouvrages situés sur les petits cours d'eau d'amont en deux catégories: ceux avec des retenues de plus de 15 mètres de haut, qu'ils qualifient de "barrages" (dam-like en anglais) et ceux avec des retenues de moins de 15 mètres de haut qu'ils qualifient de "étangs" (pond-like en anglais). Notons que cette classification est assez sommaire et ne vise qu'à augmenter le contraste entre deux catégories. Les auteurs sont conscients de l'hétérogénéité de ces catégories, mais en recherche, il faut des définitions précises de ce que l'on étudie, même si cela n'intègre pas tout ce que nous percevons subjectivement dans la classification des plans d'eau.

¹ Le rapport "Anticiper les changements climatiques en Nouvelle-Aquitaine. Pour agir dans les territoires", a été commandé par la région de Nouvelle Aquitaine à une équipe interdisciplinaire de scientifiques (dite "Acclima-Terra") dirigée par le climatologue Hervé Le Treut, académicien des sciences et ancien membre du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, IPCC en anglais).

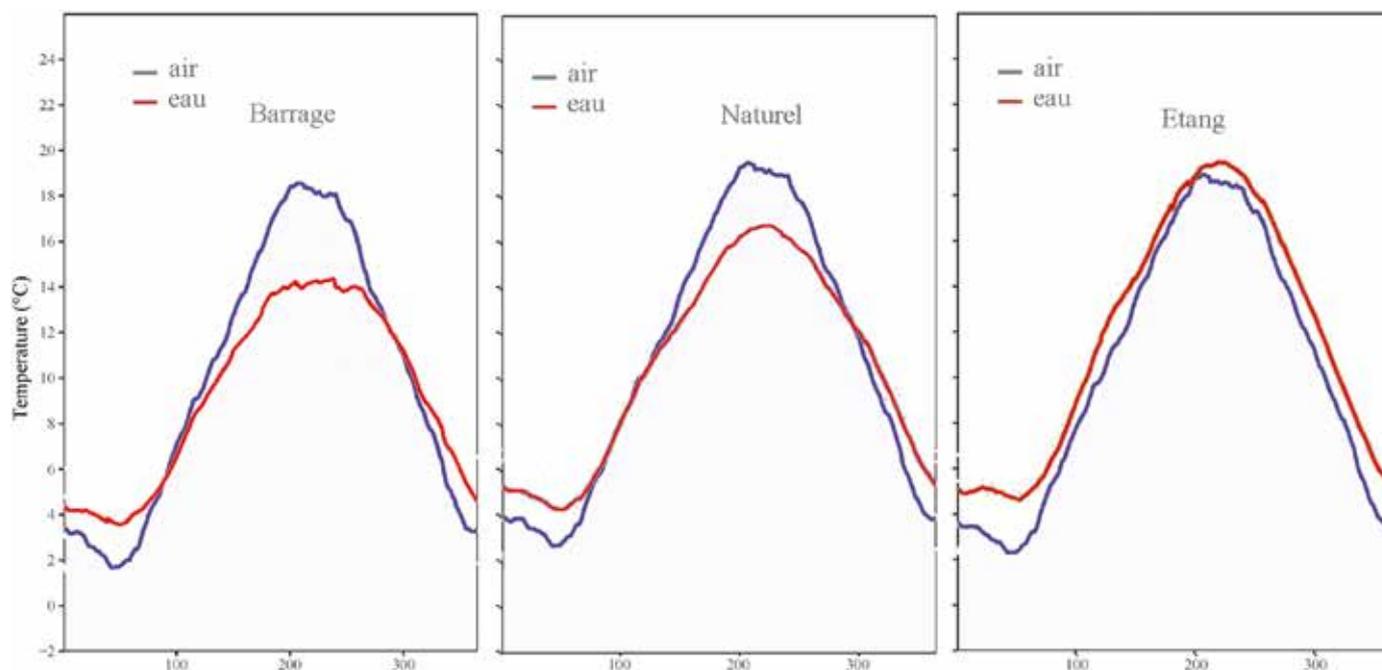


Figure 2. Evolution annuelle de la température dans la rivière (en rouge) en fonction de la température de l'air (en bleu) à la sortie d'une retenue de type barrage (à gauche), naturelle (au centre) et étang (à droite) ; on a représenté les valeurs moyennes et éliminé les variations entre relevés (modifié d'après Seyedhashemi et coll. 2021).

Leur principal résultat est donné sur la **Figure 2** : dans le témoin sans retenue artificielle, ils retrouvent le résultat vu précédemment, montrant que l'eau d'une petite rivière est un peu plus chaude que l'air en hiver (environ 1°C), et plus fraîche en été (environ 2°C). Pour la catégorie "barrage", l'eau émise par la retenue en été est plus fraîche que l'air d'environ 4°C, donc plus fraîche de 2 degrés que ce qu'elle devrait être. Pour la catégorie étang, la température de l'eau est égale à celle de l'air en été, donc plus chaude d'environ 2 degrés que ce qu'elle devrait être (**Figure 3**).

Les auteurs interprètent leurs résultats de la manière suivante: dans la catégorie barrage, l'eau est souvent rejetée au pied de l'ouvrage, tandis que dans la catégorie étang, elle est plutôt émise par

débordement. Par ailleurs, les ouvrages de la catégorie étang ont une plus grande surface, donc chauffent plus en été (figure 3). Pour le dire plus simplement, cela signifie que quand l'eau est émise par le bas, c'est de l'eau refroidie par la nappe, tandis que lorsqu'elle est émise par le haut, c'est de l'eau réchauffée par l'air et le soleil.

Malheureusement, même avec des moyens de recherche à grande échelle, les données disponibles restent limitées. C'est ainsi que la surface des plans d'eau et le temps de résidence de l'eau dans la retenue ne sont pas connus. Par ailleurs, il s'agit de valeurs moyennes, et nombre d'ouvrages ne correspondent pas au type moyen. Evidemment, il s'agit d'études en cours, et elles ne pourront que s'améliorer encore avec le temps.

On notera un grand intérêt de ces études, qui montrent d'une part la réponse différente des rivières selon la conception des ouvrages, et d'autre part la difficulté de classer les ouvrages en un petit nombre de types. Une suggestion intéressante des auteurs est qu'on pourrait réguler la température de sortie des retenues en jouant sur le couvert végétal des retenues (la ripisylve), qui protège l'eau du soleil.

6. Deux inconnues

On peut penser à deux paramètres que les utilisateurs de moulins aimeraient connaître, et que ne semblent pas apporter les études scientifiques disponibles.

a) Comment se fait le retour à l'équilibre après une perturbation ? Une donnée que les études disponibles n'apportent

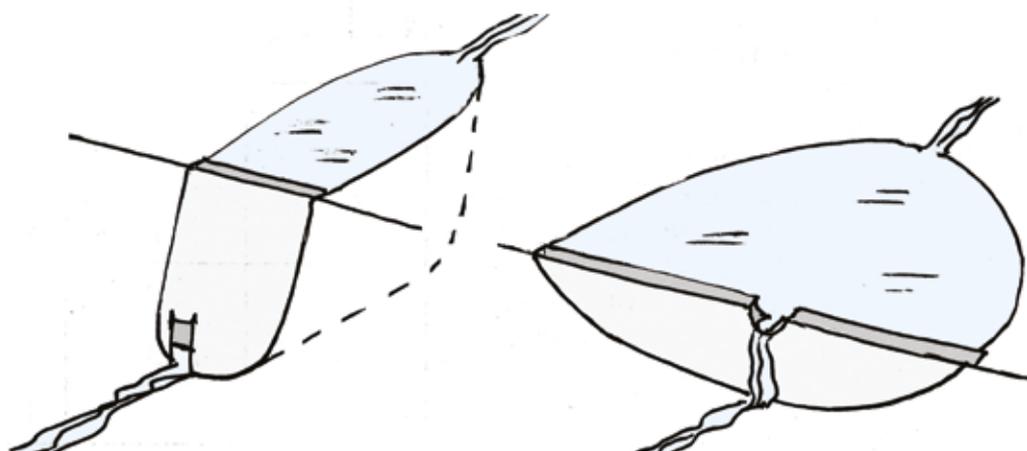


Figure 3. Les deux types d'ouvrages considérés par Seyedhashemi et coll. (2021), d'après la lecture des indications publiées par les auteurs; à gauche, le type "barrage" et à droite, le type "étang".

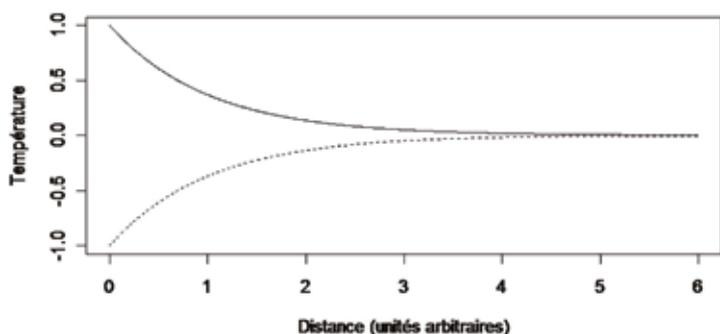
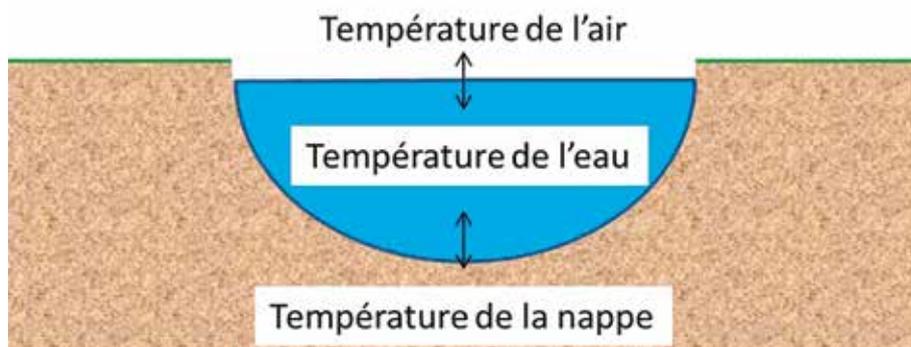


Figure 4. Distance de retour à l'équilibre thermique d'un cours d'eau après une perturbation ; en trait plein : après une augmentation de température; en tiretés : après une baisse de température.

Figure 5. Schéma d'une section de cours d'eau montrant les échanges thermiques avec l'air et avec la nappe.



pas, c'est la latence de retour à l'équilibre thermique entre le cours d'eau et les facteurs environnementaux. Après une augmentation ou une baisse d'un ou deux degrés, le cours d'eau va très vite soit céder des calories au milieu, soit en obtenir du milieu. Cela devrait prendre un temps de l'ordre de grandeur du temps de séjour dans la retenue, mais qu'on aimerait connaître plus précisément. En principe, ce retour à la normale devrait suivre une loi exponentielle (figure 4), ce qui fait que le retour est d'abord très rapide, puis se ralentit pour atteindre une asymptote. Très vite, la perturbation doit devenir indétectable, mais on ne sait pas quand (Figure 4).

b) la perturbation thermique est-elle un artefact de la mesure ? Les études à grande échelle disponibles utilisent des données satellites, lesquelles donnent des températures de surface. Or, on a vu que les échanges se font à la fois avec l'atmosphère et avec la nappe (figure 5). La température de la nappe n'est donc pas prise en compte. Pourtant, la température au sortir d'une retenue, lorsque celle-ci se fait au bas de la retenue, donne une température basse, qui reflète l'influence de la nappe. Une interprétation serait donc que, sans doute, le bilan thermique global au niveau d'une retenue est nul, mais que selon la disposition de l'émissaire, on croit observer une augmentation ou une diminution de température parce qu'on n'a pas accès aux valeurs thermiques dans l'ensemble de la colonne d'eau. Faut-il penser que les retenues favorisent un écoulement laminaire alors qu'il vaudrait

mieux qu'il soit turbulent? Dans ce cas, il serait facile d'annuler toute stratification thermique en faisant circuler l'eau par une disposition appropriée (Figure 5).

7. Les centrales nucléaires et thermiques

Les centrales nucléaires et thermiques sont installées le long des rivières à des fins de refroidissement. Elles les utilisent comme source froide pour dissiper de la chaleur, à la fois en réchauffant l'eau d'une rivière de plusieurs degrés, et en évaporant de l'eau qu'elles y prélèvent. Elles rejettent donc des calories dans l'environnement et sont des zones de réchauffement permanent des eaux douces. Les centrales nucléaires françaises font l'objet d'une surveillance et leur étude montre qu'elles sont des lieux de "tropicalisation", c'est-à-dire de constitution locale d'assemblages d'espèces qui n'existent pas normalement. Il est difficile de commenter ces résultats, car si ces études font l'objet de rapports par des agents de l'EDF, elles ne sont pas publiées dans des revues scientifiques à comité de lecture, c'est-à-dire qu'elles ne font pas l'objet d'évaluation par des experts indépendants. De fait, le contenu de ces études est insuffisant pour les évaluer de manière critique. Lorsque les agents d'EDF publient des données dans des revues scientifiques, ce n'est pas sur la question de l'impact des centrales, ce qui les obligerait à se déclarer en conflit d'intérêt. Depuis quelques années, les producteurs d'électricité ne se gênent plus pour dire que la tropicalisation des centrales, autrefois très décriée par les environnementalistes,

est moins grave aujourd'hui, puisqu'elle ne fait que s'ajouter à celle due au changement climatique. On appréciera la "verdeur" de ces convictions "écologistes". Quand bien même les zones tropicalisées des rivières se caractériseraient par un plus grand nombre d'espèces et une plus forte densité de poissons, ce ne serait pas forcément un signe de bonne santé pour un cours d'eau. J'ignore s'il y a des études sur l'effet du bouchon thermique que constitue l'eau chaude rejetée par les centrales sur le parcours des migrateurs. On peut penser que pour un poisson qui remonte le courant, avancer dans une eau plus chaude ne correspond pas à un schème comportemental inné.

8. Le changement climatique

Un facteur important agissant sur la température des cours d'eau est le changement climatique. Celui-ci donne lieu à deux types d'études : des études actuelles et des études de prospective.

1. Données actuelles. La température moyenne de la planète a augmenté d'environ 1°C depuis l'ère préindustrielle ; un effet surtout sensible au cours des dernières décennies. Il a un fort impact sur les rivières. Le rapport AcclimaTerra (dit aussi "Le Treut") montre l'accroissement de température subi depuis quelques décennies par les rivières du littoral atlantique (Figure 6).

Chacun sait que l'objectif des accords de Paris est de limiter le réchauffement global à 1,5°C, un espoir probablement très optimiste. Le réchauffement actuel

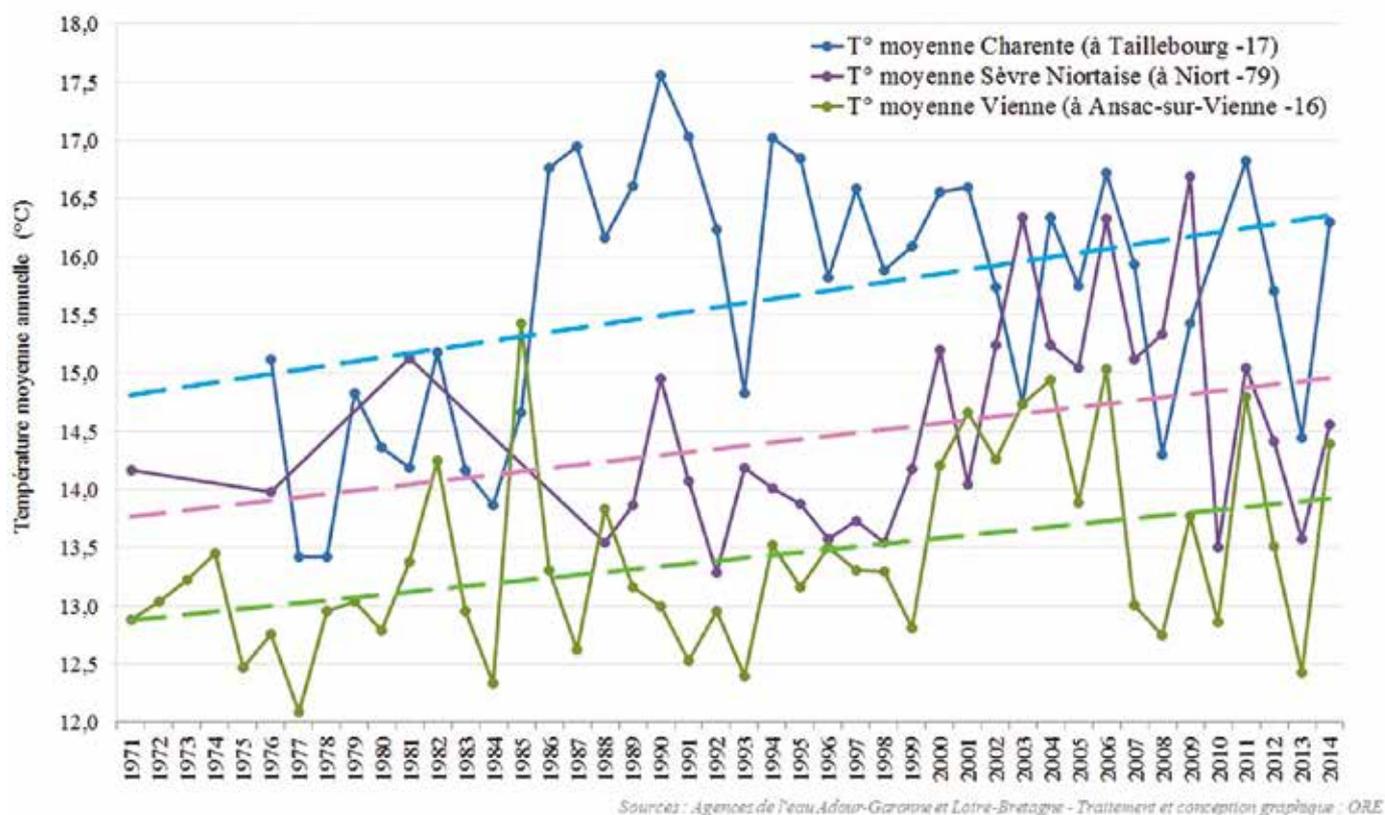


Figure 6. Augmentation de température de trois rivières de Nouvelle Aquitaine entre 1971 et 2014, selon le rapport Acclima-Terra (dit "Le Treut", p. 129) ; le rapport prévoit "une augmentation de la température des eaux superficielles, parfois de près de deux degrés à l'horizon 2050".

à déjà un effet significatif sur la faune halieutique. Une étude de présence/absence des espèces couvrant 655 sites des rivières françaises menée par les laboratoires CNRS de Toulouse et Grenoble (Buisson et coll. 2008), a montré que les espèces d'eaux froides sont en régression, et que, corrélativement, les espèces d'eaux moins froides vivant normalement en aval devraient avoir tendance à étendre leur distribution vers l'amont des bassins et à remplacer les précédentes. Parmi les espèces menacées figure en première ligne la truite, suivie de la lamproie, la brème, la loche commune, etc. et le saumon, bien que la régression de ce dernier soit rendue difficile à évaluer du fait des politiques de lâchers. Les données de l'Onema portant sur 480 sites (Poulet et coll. 2011) mettent en évidence des baisses d'abondance allant dans le même sens, notamment pour la tanche, l'anguille, la brème et la truite. On assiste corrélativement à une inévitable augmentation des espèces invasives, notamment *Pseudorasbora parva* et le poisson-chat *Silurus glanis*. Récemment, une collaboration de grande ampleur (Legrand et coll. 2020) portant sur trente ans de données sur les poissons migrateurs (alose, bardoie, saumon, truite commune, anguilles) dans 28 rivières

françaises s'étendant du Pays Basque à la Somme a montré qu'en moyenne, les périodes de migration sont plus précoces au cours de l'année et ont avancé de 2,3 jours par périodes de 10 ans. Le chauffe-eau est donc bien branché, et il est difficile de savoir jusqu'à quand il va fonctionner.

2. Etudes prospectives. Un élément de prévision intéressant est le rapport "Anticiper les changements climatiques en Nouvelle-Aquitaine. Pour agir dans les territoires" du collectif "Acclima-Terra". Ce rapport anticipe une augmentation de 2°C de la température des rivières du littoral atlantique d'ici 30 ans.

Ses conclusions sur les conséquences de l'élévation générale des températures sont intéressantes, du fait de la cascade de catastrophes qu'il prévoit :

L'augmentation de la température des eaux superficielles, parfois de près de deux degrés à l'horizon 2050 (cf. [...] pour l'estuaire de la Gironde), entraînera une baisse de l'ordre de 3 à 5 % de la teneur en oxygène, composant fondamental pour la vie des écosystèmes, pour une bonne auto-épuration et la limitation de l'eutrophisation. L'augmentation de la température des eaux et du sol, associée à des changements importants des cycles et régimes des précipitations, contribuera à

accélérer la remobilisation plus importante des polluants venant du sol vers les nappes (nitrates, pesticides, métaux), ainsi qu'à amplifier les processus d'humification eau/sol, se traduisant par une remobilisation plus importante, sous forme dissoute, du carbone organique, de l'azote et du phosphore. Cette augmentation de la température aura aussi un impact sur les populations microbiennes, bien que mal évalué à ce jour, comme l'érosion de la biodiversité et l'augmentation de la vulnérabilité des communautés de microalgues indigènes, ainsi que la prolifération des micro-organismes pathogènes et des cyanobactéries avec leurs risques de production de toxines associées (p. 131).

9. Remarques finales et conclusions

On se sent peu de chose quand on n'a qu'un petit moulin pour perturber la planète. Nous ne jouons pas dans la cour des grands. Néanmoins, il est utile de faire le compte des bonnes et des mauvaises nouvelles :

1. Premièrement, les fleuves et les grandes rivières semblent insensibles aux perturbations thermiques classiques, c'est-

à-dire celles qui affectent l'équilibre entre les facteurs normaux de l'environnement, air, soleil et nappe (c'est-à-dire quand on ne considère pas l'effet des centrales thermiques et nucléaires). Il faut avouer que c'est plutôt une bonne nouvelle pour les migrateurs qui remontent les fleuves. On ne s'intéressera donc dans ce qui suit qu'aux petites rivières de moins de 100 km placées en amont des bassins versants.

2. Les études mettent en évidence des effets opposés des grandes retenues sur la température de l'eau qui les traverse. C'est déjà en soi un résultat important, parce qu'il interdit toute généralisation. Par ailleurs, ces études sont encore trop approximatives pour entrer dans le détail de la diversité des ouvrages.

3. Concernant les petites retenues des moulins. Rien ne nous dit qu'elles ont le même effet que les retenues de plus ou moins 15 m de haut utilisées dans l'étude du bassin de la Loire de 2021. Mais si c'était le cas, nous voyons que l'on pourrait facilement réguler leurs effets thermiques en veillant à ce que l'eau soit émise, soit par le haut des retenues, soit par le bas, ou encore qu'elle soit homogénéisée. On

voit aussi que l'on peut jouer sur l'ombrage apporté par la ripisylve. Rétrospectivement, on peut se féliciter que, depuis des siècles, le travail quotidien des moulinsiers pour entretenir leurs berges a permis, à la fois de préserver l'ombrage des arbres favorisant la fraîcheur des rivières, et de supprimer les embâcles, qui sont la conséquence néfaste de cette ripisylve sur la continuité de l'écoulement lorsque le cours d'eau n'est pas surveillé.

4. Il faudrait mener des études pour quantifier la baisse des effets thermiques en aval des retenues, car, s'il y a une perturbation thermique, on peut s'attendre à ce qu'elle s'estompe et devienne non-significative à assez courte distance.

5. La mauvaise nouvelle est dans l'avalanche de catastrophes prédite par les climatologues, qui concerne les bassins dans l'ensemble de leur surface, et dans les réponses inappropriées que leur donneront sans doute les acteurs locaux. Le rapport Le Treut s'alarme du fait que la "tentation de transfert des prélèvements vers les eaux souterraines présente le risque d'une adaptation spontanée et sauvage au changement climatique". Sans réponse

adaptée, notre société court le risque de surexploiter les nappes, d'abaisser le niveau des rivières, de les rendre encore plus sujettes aux perturbations thermiques, et de libérer la boîte de Pandore des divers toxiques piégés dans les sédiments et remobilisés par lessivage

Certes, tout cela n'engage pas la responsabilité des moulins, mais il faut bien voir que de toute façon, du début à la fin de cette affaire, les moulins servent d'écran pour cacher des réalités bien tangibles, lesquelles menacent l'ensemble des eaux continentales et leur biodiversité. C'est en cela que les moulins, bien malgré eux, sont concernés. Chacun sait comment se cacher le monde derrière un petit doigt. Ici on cache une catastrophe derrière les moulins parce que, comme le baudet de la fable de La Fontaine, ils sont sans défense.

Ils sont utilisés pour masquer les facteurs majeurs et les intérêts économiques considérables qui concourent à polluer nos rivières. En assurant leur défense, les moulins contribuent à assurer la défense de notre environnement.

Références citées

Acclima Terra. Rapport Le Treut "Anticiper les changements climatiques en Nouvelle-Aquitaine. Pour agir dans les territoires", site Acclima Terra <<https://www.acclimaterra.fr/rapport-page-menu/>>

Belliard, J., Gorges, G., Hette, N., Le Pichon, C., Tales, E. & Zahm A. 2010. Programme PIREN-Seine. La répartition des peuplements de poissons dans le bassin de la Seine: modèles à large échelle et focus sur les petits bassins versants franciliens. Sorbonne Université.

Buisson, L., Thuiller, W. Lek, S., Lim, P. & Grenouillet, G. 2008. Climate change hastens the turnover of stream fish assemblages. *Global Change Biology* 14 : 2232–2248.

Bustillo, V., Moatar, F., Ducharne, A., Thiéry, D. & Poirel, A. 2014. A multimodel comparison for assessing water temperatures under changing climate conditions via the equilibrium temperature concept: case study of the Middle Loire River, France. *Hydrological Processes* 28: 1507–1524.

Caissie, D., 2006. *The thermal regime of rivers: a review*. *Freshwater Biology* 51: 1389–1406.

Kelleher, C., Wagener, T., Gooseff, M., McGlynn, B., McGuire, K. & Marshall, L., 2012. Investigating controls on the thermal sensitivity of Pennsylvania streams. *Hydrological Processes* 26: 771–785.

Legrand, M., Briand, C., Buisson, L., Besse, T., Artur, G., et al.. 2020. Diadromous fish modified timing of upstream migration over the last 30 years in France. *Freshwater Biology*. DOI : 10.1111/fwb.13638

Moatar, F. & Gailhard, J., 2006. Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1881. *Comptes Rendus Geosciences* 338: 319–328.

Poulet, N., Beaulaton L. & Dembski. 2011. Time trends in fish populations in metropolitan France: insights from national monitoring data. *Journal of Fish Biology* 79 : 1436–1452.

Syedhashemi, H., Moatar, F., Vidal, J.-P., Diamond, J. S., Beaufort, A., Chandresris, A. & Valette, L.. 2021. Thermal signatures identify the influence of dams and ponds on stream temperature at the regional scale. *Science of The Total Environment* 766: 142667.

Smith, K. & Lavis, M.E., 1975. Environmental influences on the temperature of a small upland stream. *Oikos* 26: 228–236.

Webb, B.W. & Walling, D.E., 1993. Temporal variability in the impact of river regulation on thermal regime and some biological implications. *Freshwater Biology* 29: 167–182.

Je remercie Patrice Cadet pour ses commentaires et Fabien Bonnaudet pour l'indication d'une référence.