



HAL
open science

L'influence des étangs à moine sur la qualité des ruisseaux en tête de bassin, l'exemple de la température de l'eau du Limousin et du Berry

Laurent Touchart, Pascal Bartout

► To cite this version:

Laurent Touchart, Pascal Bartout. L'influence des étangs à moine sur la qualité des ruisseaux en tête de bassin, l'exemple de la température de l'eau du Limousin et du Berry. Mieux comprendre les étangs. Expériences nationales et internationales du Berry limousin à l'Europe orientale, 2015, Brive-la-Gaillarde, France. pp.140-150. hal-02093956

HAL Id: hal-02093956

<https://univ-orleans.hal.science/hal-02093956v1>

Submitted on 4 Jun 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Touchart L. & Bartout P., 2015, « L'influence des étangs à moine sur la qualité des ruisseaux en tête de bassin, l'exemple de la température de l'eau du Limousin et du Berry » in Touchart L., Bartout P. & Motchalova O., Dir., *Mieux comprendre les étangs. Expériences nationales et internationales du Berry limousin à l'Europe orientale*. Brive, les Monédières, 422 p.: pp. 140-150.

Pour HAL :

Mise en page différente de celle de l'éditeur

Traduction des titres de figure en anglais

L'influence des étangs à moine sur la qualité des ruisseaux en tête de bassin, l'exemple de la température de l'eau du Limousin et du Berry

par L. Touchart L. & P. Bartout, 2015

Résumé : Dans les régions du Centre-ouest de la France, le système de sortie d'eau profonde appelé « moine » équipe 13 % des étangs. Mais l'administration incite fortement à augmenter cette proportion, arguant de ce que cet équipement réduirait le réchauffement des étangs sur le réseau hydrographique. Nous avons mesuré les températures de l'eau de quatre étangs à moine pendant 13 ans, si bien que cet article repose sur le traitement de 142 200 données inédites. Par rapport au déversoir de surface, le moine est un système qui (i) décale le réchauffement du cours d'eau émissaire sur la fin de l'été et l'automne, (ii) réduit le réchauffement moyen annuel à environ 1°C, (iii) réduit le réchauffement des maxima diurnes, (iv) augmente le réchauffement des minima. L'étang à moine réchauffe la rivière par une eau profonde qui a acquis sa chaleur par convection mécanique, causée par le vent, au contraire de l'étang à déversoir, qui fournit une eau de surface réchauffée par l'insolation. En hiver, l'étang à moine ne dégrade pas les conditions thermiques de la vie sous gravier embryono-larvaire de la Truite fario. En été, le moine empêche le refroidissement nocturne de l'émissaire et augmente trop fortement la température des minima pour les espèces sensibles.

Mots clefs : étang, ruisseau, tête de bassin, température de l'eau, convection, moine, vanne, Truite fario.

Introduction

La température de l'eau est le caractère physique majeur, qui conditionne l'état de santé et la qualité des réseaux hydrographiques (Williams, 1968). Elle influence la vie des organismes aquatiques de façon directe (Brett, 1956, Burrows, 1967, Brown, 1969, Brooker, 1981, Verneaux, 1973, Dajoz, 1985, Calow et Petts, 1992, Amoros et Wade, 1993, Harper, 1995, Crisp, 1996, Angelier, 2000) et de manière indirecte en agissant sur la saturation en oxygène (Truesdale *et al.*, 1955) et la solubilité des gaz (Labroue *et al.*, 1995). Moins étudié par les scientifiques que l'influence des lacs de barrage sur les grandes rivières, l'effet thermique des étangs sur les ruisseaux est plutôt connu par les travaux des organismes professionnels et les publications de rapports internes (Palisson, 1972, Mouillé, 1982, Gisclard, 1985, Denardou, 1987, Flirden, 2001, Trintignac et Kerléo, 2004, Géonat, 2008). Une meilleure connaissance de la température de l'eau dans la partie amont des réseaux hydrographiques est devenue indispensable depuis la mise en place de la Directive Cadre Européenne de 2000, qui oblige à préserver la qualité de l'eau en tête de bassin. L'impact des étangs sur la qualité de l'eau du petit chevelu hydrographique de tête de bassin dépend-il des équipements de sortie d'eau à la digue des étangs ? Si oui, comment minimiser l'influence des étangs sur la température des ruisseaux émissaires ?

En France, l'administration impose en nombre toujours plus grand la réalisation de travaux à la charge des propriétaires, tout en subventionnant les effacements d'étang. Ces prescriptions surviennent en particulier lors des ventes, des demandes de régularisation et de reconnaissance d'antériorité, des changements de statut ou encore lors de non renouvellements de pisciculture. L'administration a cependant la prérogative d'exiger la mise en place d'équipements à tout moment, ceux-ci devant alors être réalisés dans les deux ans, quel que soit le statut de l'étang (étang fondé en titre, étang piscicole ancien datant d'avant 1829, pisciculture à vocation touristique, eau close, eau libre). Parmi ces équipements, le moine est l'un des plus couramment imposés.

La présente recherche n'abordera pas les travaux en lien avec la sécurité du barrage, pour s'intéresser aux seuls équipements demandés dans le contexte de la diminution de l'impact sur le milieu. A l'intérieur de cette seconde famille, le cas de la dérivation, étudié par ailleurs (Touchart et Bartout, 2011) sera ici laissé de côté, pour se focaliser sur le seul moine. Ce système de sortie d'eau de fond ou de mi-fond est-il vraiment efficace et adapté à tous les cas ? L'étude du Centre-Ouest de la

France, en particulier du Limousin et du Berry, peut apporter des éléments de réponse. En effet, ces régions cristallines comptent un grand nombre d'étangs, environ 20 000, de tailles diverses, dont une part importante présentent une grande profondeur. Grâce à ces derniers, l'étude thermique de la profondeur de soutirage de l'eau à la digue de l'étang peut être réalisée dans une gamme particulièrement large. En outre, certaines circonscriptions administratives de cette région offrent des particularités intéressantes à prendre en compte dans une étude géographique complète. Ainsi le Conseil Général de la Corrèze octroie une aide financière aux propriétaires d'étangs, allant jusqu'à 30 % du coût des travaux, pour les équipements comme le moine, diminuant l'impact sur le milieu, alors que, classiquement, l'Agence de l'Eau et le Conseil Régional n'aident financièrement que les suppressions d'étang.

1. La répartition géographique des étangs à moine

Le moine est un système d'évacuation des eaux de l'étang placé en avant de la digue et de la buse de vidange, qui permet de puiser l'eau à différentes profondeurs et de réguler le débit sortant. Il est composé de parties en maçonnerie, le radier et la cage, et d'éléments amovibles, que forment une ou plusieurs grilles et rangées de planches. Son fonctionnement a été décrit par M. Huet (1970), B. Bachasson (1997), J. Arrignon (1998), B. Breton (2001), O. Schlumberger (2002), D. Boch (2004), L. Touchart et P. Bartout (2010).

Sur 18 187 masses d'eau pouvant être considérées comme des étangs à l'échelle du Limousin, 10 858 ont été renseignées sur leur système d'évacuation des eaux et seuls 1 453 comportent un moine, soit 13 % du total étudié (Bartout, 2010, 2012). Dans le Berry, le recensement a été effectué pour le bassin de la Vauvre et la proportion monte à 16 % (Bartout, inédit). Ce pourcentage, relativement faible, est bien en deçà de ce que voudraient les autorités administratives nationales et montre le travail de sensibilisation restant à accomplir pour voir cet aménagement occuper prioritairement les digues d'étangs, si jamais cela était souhaitable.

Par rapport aux autres étangs limousins, ceux pourvus d'un moine sont sur-représentés sur les rangs 1 et 2 de Strahler, mais moins nombreux sur les rangs 0. Cela pourrait s'expliquer par une moins grande sensibilisation auprès des propriétaires des petits étangs sur source, par une mise en demeure législative plus pressante pour les étangs barrant un ruisseau pérenne ou par un besoin d'approvisionnement permanent en eau puisque le système du moine crée des pertes qu'il s'agit de compenser. Un lien avec la morphométrie de l'étang serait ainsi possible. En effet, les étangs à moine sont un peu plus profonds (médiane à 2,20 m contre 1,80 m tous étangs confondus) et nettement plus étendus (moyenne à 1,26 ha contre 0,60 ha) que les autres étangs. Ajoutons que les étangs à moine sont souvent situés sur des chaînes d'étangs (54 % contre 37,6 % tous étangs confondus) et sont rarement les plus en amont. L'eau de l'émissaire a donc déjà subi, pour près d'un sur deux une modification physique de ses qualités avant d'entrer dans un étang muni d'un moine (distance moyenne de l'étang en amont le plus proche, 70 m, contre 110 m pour tous les étangs réunis).

Nous avons sélectionné quatre étangs à moine, qui appartiennent tous au bassin de la Loire et au sous-bassin de la Vienne. Les deux sites de mesure en continu sont ceux de l'étang de la Pouge (45°47' Nord – 0°56' Est) et de l'étang de la Chaume (46°20' Nord – 1°27' Est). De dimensions comparables, ils barrent chacun un cours d'eau de rang 4 selon la classification de Strahler, celui où l'amplitude thermique diurne des cours d'eau est la plus forte selon Vannote (1980). Deux sites d'observation ont été ajoutés, où les mesures ne sont pas effectuées en tant que telles pour quantifier l'influence du seul moine. Il s'agit de chaînes d'étangs complexes, où se succèdent non seulement plusieurs plans d'eau, mais aussi plusieurs systèmes d'évacuation des eaux, le déversoir de surface, la dérivation et le moine. La chaîne des Ribières (45°55' Nord – 1°57' Est) appartient au bassin du Thaurion ; la chaîne de Rochegaudon et du Moulin (46°26' Nord – 1°17' Est) appartient au bassin de la Creuse.

2. Méthodes d'enregistrement de la température de l'eau horaire

Sachant que, en dehors de rares exceptions (Webb & Walling, 1996, 1997), la plupart des études concernant la température de l'eau des rivières et de leur influence par les plans d'eau ne durent le plus souvent que quelques mois d'affilée (Smith, 1972), les principales originalités méthodologiques de la présente recherche s'appuient d'une part sur la longueur temporelle de la série de données en continu, d'autre part sur leur représentativité spatiale. La température de l'eau est mesurée par des thermomètres enregistreurs subaquatiques, à sonde piézoélectrique, dont la précision est à deux dixièmes. Cependant, nous les étalonnons au moyen d'un thermomètre manuel de grande précision. Il s'agit d'un thermomètre à résistance *Lufft C100* avec capteur de platine 100 à montage à 4 fils. Le thermomètre utilisé pour cette recherche a comme numéro de série 033.0805.0202.4.2.1.20 et voit sa précision garantie au centième de degré par un certificat établi chaque année par le service de métrologie d'Avantec, pour des températures de 0 °C et 30 °C.

De 1997 à 2010, nous avons directement équipé, fait la maintenance et relevé sur le terrain une quarantaine de thermomètres subaquatiques enregistreurs répartis sur une trentaine de sites en Limousin et en Berry. Compte tenu des avaries, pertes et autres problèmes, nous avons récolté au total environ un million sept cent mille données inédites de températures de l'eau en une dizaine d'années (données L. Touchart). A l'intérieur de ce total, la plupart des données concernent le suivi des étangs à déversoir de surface et, secondairement, celui de petits lacs de barrage à vanne de fond. Les mesures des étangs à moine ne viennent qu'en troisième position et représentent environ cent quarante mille températures, soit 8 % de notre base de données totale.

3. Résultats : un réchauffement modéré, mais permanent, du réseau hydrographique

3.1. La différence entre l'entrée et la sortie de l'étang : un réchauffement du cours d'eau, mais un amoindrissement des écarts diurnes

Sur les plans d'eau sélectionnés, l'influence annuelle, mesurée en comparant les valeurs dans le ruisseau à l'entrée et à la sortie de l'étang à moine, correspond à un réchauffement du cours d'eau de 1,2 °C. Le cycle saisonnier, étudié à travers les moyennes mensuelles, montre une influence pratiquement nulle de l'étang sur le cours d'eau pendant le semestre froid décalé sur le printemps, de décembre à mai, et un net réchauffement pendant le semestre chaud décalé sur l'automne, de juin à novembre. Le réchauffement culmine en août et septembre.

Si l'on prend les données horaires, l'étude annuelle montre que l'étang à moine réchauffe le cours d'eau pendant les deux tiers de l'année, dans une fourchette où la classe allant de 2 à 4 °C prend une remarquable importance. Par exemple, pour les 17 520 heures allant du 1^{er} janvier 1998 à 1h au 31 décembre 1999 à 23h, la rivière Gorret a été réchauffée par l'étang de la Pouge pendant 11 587 heures soit 66 % du temps. La température était rigoureusement égale entre l'entrée et la sortie de l'étang pendant 1 116 heures soit 6 % du temps. La rivière a été refroidie par le moine pendant 4 817 heures soit 27 % du temps. A l'intérieur des 11 587 heures de réchauffement provoqué par le moine, 6 040 heures (34 % du temps total des deux années et 52 % du temps de réchauffement) ont connu des valeurs supérieures ou égales à 2 °C, 1 878 heures (11 % du temps total et 16 % du temps de réchauffement) des valeurs supérieures ou égales à 4 °C, 398 heures (2 % du temps total et 3,4 % du temps de réchauffement) des valeurs supérieures ou égales à 6 °C et 24 heures (0,1 % du temps total et 0,2 % du temps de réchauffement) des valeurs supérieures ou égales à 8 °C.

Au contraire des maxima thermiques de la rivière, qui sont assez peu modifiés par l'étang à moine, les minima sont fortement réchauffés. En amont et en aval de l'étang, le minimum minimorum de n'importe lequel des douze mois est augmenté par le moine. Ce réchauffement culmine en août,

soit une augmentation due au moins allant de 4,8 °C à 8,2 °C selon les étangs. Les maxima étant peu modifiés, cependant que les minima sont fortement réchauffés, la conséquence est un amenuisement par le moins de l'écart de température entre le jour et la nuit. L'amplitude diurne de la rivière est, en moyenne annuelle, diminuée par l'étang à moins de plus d'un degré et demi par le moins et se trouve être quatre fois plus faible à la sortie de l'étang qu'à l'entrée. Un dernier critère peut permettre d'appréhender l'effet du moins sur les variations de température de la rivière à courte échelle de temps. Il s'agit de la différence entre la moyenne journalière maximale et minimale de chaque mois, qu'on appellera écart interdiurne. Cette valeur est surtout diminuée par l'étang en juin, juillet et août.

Au total, c'est en fin d'été, particulièrement en août et septembre, que l'étang à moins réchauffe le plus le cours d'eau, que ce soit en moyenne mensuelle ou en maximum instantané. Or c'est pendant ces mêmes mois les plus chauds que l'étang à moins stabilise le mieux les variations de température de la rivière à court terme, d'une heure à l'autre et d'un jour à l'autre.

3.2. La longueur de l'émissaire influencée : une question de minima diurnes

L'équipement du linéaire fluvial le plus long concernant nos données en aval d'un étang à moins se trouve sur le ruisseau de la Chaume, instrumenté par cinq thermomètres enregistreurs sur plus de dix kilomètres en aval de la digue, jusqu'au confluent avec la Benaize. Un sixième thermomètre se trouve en amont de l'étang, donnant la référence de température fluviale non influencée.

En moyenne estivale, l'essentiel du réchauffement est perdu sur les quatre premiers kilomètres, cependant qu'une succession de plusieurs étangs empêche le réajustement fluvial de s'opérer plus rapidement. Au-delà des moyennes, les maxima diurnes subissent peu de changement et les valeurs sont presque les mêmes entre l'entrée de l'étang et le point situé à une dizaine de kilomètres en aval, le léger réchauffement causé par le moins ayant été comblé par le refroidissement le long de l'émissaire. Au contraire, les minima diurnes, fortement réchauffés par l'étang à moins, sont propagés loin en aval sur l'émissaire. Par exemple, le plus fort écart instantané entre le thermomètre situé à 10 425 m et celui placé en amont de l'étang, qui a atteint +2,92 °C, a été mesuré le 1^{er} août 2007 à 7h du matin. Le deuxième, qui a atteint +2,90 °C, a eu lieu le 14 août à 6 h du matin. Toutes ces valeurs correspondaient à des minima diurnes de l'amont très prononcés, pendant que le moins fournissait une eau assez chaude et plutôt stable, sans variation d'une heure à l'autre.

Changeant peu les maxima tout en réchauffant les minima, l'étang à moins écrase l'amplitude diurne et cet écart affaibli se propage lui aussi sur l'émissaire sur plusieurs kilomètres.

4. Discussion : comment une eau de fond d'étang propagée dans un émissaire fluvial dégrade-t-elle la qualité biogéographique d'un cours d'eau ?

4.1. Discussion limnologique : un effet thermique rythmé par le brassage forcé

Même en tenant compte du fait que le moins est utilisé en Limousin plus comme une vanne de fond figée que comme un système mélangeur qui pourrait avoir une certaine souplesse, l'eau de l'émissaire à la sortie de l'étang n'est malgré tout pas exactement celle du fond de l'étang. C'est plutôt un mélange d'eaux de fond. En effet, le système du moins d'une part évacue une tranche d'eau d'une certaine épaisseur, d'autre part perturbe la stratification au niveau de la digue.

La comparaison entre nos mesures en profondeur à l'intérieur de l'étang et à la sortie du moins montre que, au printemps, en été et en automne, l'eau qui sort par le moins est toujours plus chaude que celle du fond de l'étang. Cet écart peut être interprété par le mélange des couches profondes artificiellement réalisé dans le système d'évacuation de l'eau. Cette différence est maximale en période de stratification thermique de l'étang, quand le moins mélange une eau hétérogène, ajoutant à

celle du fond d'autres couches plus chaudes qui lui étaient superposées : la température de l'eau évacuée dans l'émissaire est alors bien plus élevée que celle du fond de l'étang. La différence baisse quand l'étang est brassé de façon naturelle, que ce soit habituellement, en avril et octobre lors du renversement thermique, ou de manière exceptionnelle, comme lors du mois de juillet 2000, marqué par un grand nombre de perturbations atmosphériques.

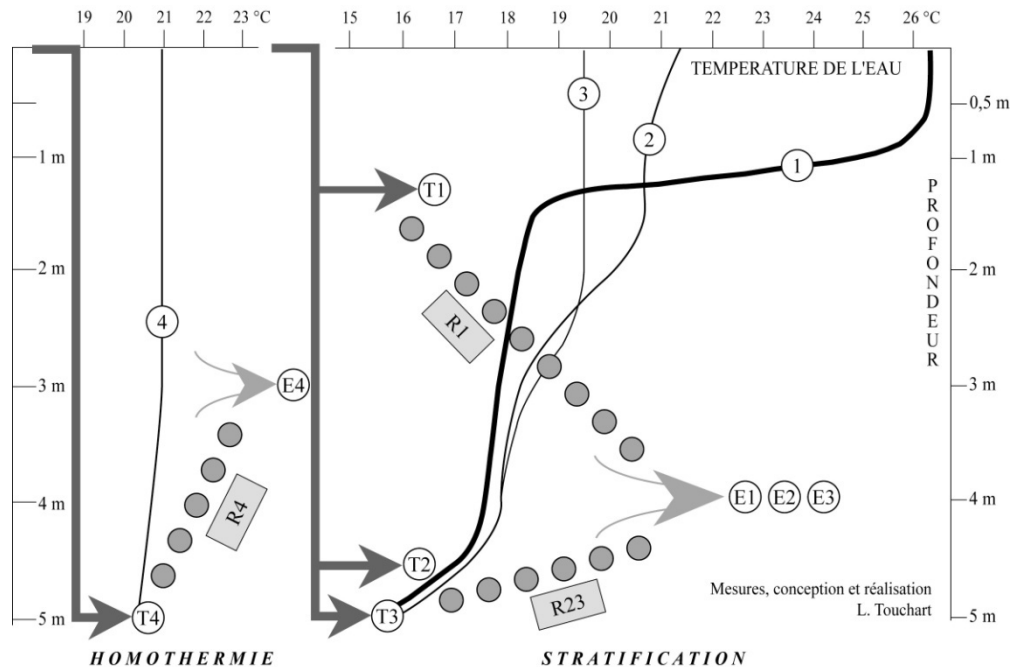


Fig. 1 L'influence du moine sur la température du ruisseau du Gorret en fonction des alternances de stratification et d'homothermie à l'intérieur de l'étang de la Pougé
Fig. 1 The effect of monk on water temperature of the stream Gorret depending on alternations between stratification and homothermy in the pond of Pougé

Légende. 1 à 4 : profil thermique de l'étang. 1 : stratification le 1^{er} juin 2000 à 20 h. 2 : stratification le 5 juin 2000 à 20 h. 3 : stratification le 6 juin 2000 à 8 h. 4 : homothermie le 10 juillet 2000 à 7 h. T1 à T4 : température du tributaire à l'entrée de l'étang (la profondeur des flèches correspond à la profondeur de l'étang où se trouve au même moment la température équivalente). T1 : température du tributaire de 19,8 °C le 1^{er} juin 2000 à 20 h, correspondant à 127 cm de profondeur. T2 : température du tributaire de 17,0 °C le 5 juin 2000 à 20 h, correspondant à 455 cm de profondeur. T3 : température du tributaire de 15,3 °C le 6 juin 2000 à 8 h, plus froide que le fond de l'étang. T4 : température du tributaire de 16,0 °C le 10 juillet 2000 à 7 h, plus froide que le fond de l'étang. E1 à E4 : température de l'émissaire à la sortie de l'étang (la profondeur des flèches correspond à la profondeur de l'étang où se trouve au même moment la température équivalente). E1 : température de l'émissaire de 17,7 °C le 1^{er} juin 2000 à 20 h. E2 : température de l'émissaire de 17,7 °C le 5 juin 2000 à 20 h. E3 : température de l'émissaire de 17,7 °C le 6 juin 2000 à 8 h. E4 : température de l'émissaire de 20,9 °C le 10 juillet 2000 à 7 h. R1 à R4 : Différence de température entre la sortie et l'entrée de l'étang. R2-3 : réchauffement modéré de l'émissaire provoqué par le moine en période de stratification de l'étang (cas estival habituel). R4 : réchauffement très fort de l'émissaire provoqué par le moine en période de brassage mécanique de l'étang (cas de perturbation atmosphérique estivale). R1 : refroidissement de l'émissaire provoqué par le moine en période caniculaire de stratification très prononcée de l'étang (cas rare).

Ce sont ainsi les couches profondes de l'étang, aspirées par le moine, dont la température détermine celle de l'émissaire fluvial. Ce degré de chaleur des profondeurs de l'étang dépend des deux états connus par l'étang pendant la saison chaude, la stratification et le brassage. La plupart du temps, l'étang de plus d'un mètre cinquante est stratifié. Au contraire, lors de passages brefs et assez rares, la

tranche d'eau est brassée, selon un rythme d'environ une décade jusqu'à trois à quatre mètres, quatre à cinq semaines au-delà de cinq à six mètres (Touchart, 2002).

L'état estival le plus durable, celui de stratification thermique, est celui pendant lequel l'étang réchauffe modérément l'émissaire. Le tributaire est assez chaud à l'amont, tandis que l'insolation sur l'étang isole pendant plusieurs semaines sous la thermocline une couche profonde, l'hypostagnion (Touchart, 2007), sans contact avec les couches superficielles. L'hypostagnion est certes en général un peu plus chaud que le cours d'eau entrant, mais la différence n'est pas grande, si bien que l'émissaire est légèrement réchauffé par l'étang. C'est le cas en juin. A la fin de longues périodes caniculaires, qui ont réchauffé le ruisseau amont tout en isolant un hypostagnion frais, le plan d'eau à moine peut même refroidir le cours d'eau.

C'est ce même état de stratification qui explique combien le moine écrase les variations à courte échelle de temps, que ce soit l'amplitude diurne ou l'écart interdiurne. L'hypostagnion, sans échange avec la surface de l'étang, distille pendant plusieurs semaines une eau aux températures inchangées entre le jour et la nuit, ainsi que d'un jour à l'autre, tant que la stratification n'est pas dérangée.

C'est enfin cette même stabilité de la couche profonde de l'étang qui explique que l'écart de température entre le cours d'eau à l'amont et à l'aval du plan d'eau à moine dépende des variations de l'amont. En l'absence de changement de température de la sortie d'eau, ce sont les moments de refroidissement de l'amont qui provoquent les écarts thermiques les plus forts avec l'aval et les moments de réchauffement de l'amont qui amenuisent les différences de température avec l'aval, en se plaçant dans une situation permanente d'aval plus chaud que l'amont. Concrètement, en période de stabilité, ce phénomène provoque l'arrivée des maxima diurnes du réchauffement causé par l'étang au cours d'eau tôt le matin, quand le tributaire est le plus froid.

A l'inverse de l'état de stratification thermique, l'étang profond connaît quelques épisodes de brassage pendant le semestre chaud. La thermocline se casse, le vent mélange les couches précédemment superposées et les calories accumulées en surface se répartissent sur toute la tranche d'eau jusqu'au fond. Le moine soutire alors une eau réchauffée par son brassage avec la surface. A toutes les échelles de temps, les moments pendant lesquels le cours d'eau est le plus réchauffé par l'étang à moine correspondent aux périodes de destruction de la stratification thermique. A longue échelle de temps, c'est ce qui explique les réchauffements durables de l'émissaire, qui se manifestent dans les moyennes mensuelles de fin d'été et d'automne, en particulier les valeurs élevées de septembre. A courte échelle de temps, c'est ce qui explique les forts réchauffements dus à l'étang sur quelques heures, quand il y a un brassage après une période de forte insolation, notamment lors du passage estival d'une perturbation ou d'un orage. C'est aussi ce qui explique que les minima minimorum du cours d'eau de chaque mois d'été forment la variable pour laquelle l'étang à moine provoque le plus fort réchauffement entre l'amont et l'aval. Mais le cas des minima mérite un traitement plus détaillé.

Pendant le semestre chaud, les minima du cours d'eau entrant dans l'étang ont deux origines. Les premiers accompagnent les perturbations atmosphériques, les seconds sont provoqués par rayonnement nocturne en période de stabilité anticyclonique.

Les minima les plus froids du cours d'eau se produisent, à l'amont, quand une dépression d'ouest atteint la région et apporte des précipitations estivales. Or il se trouve que, accompagnée de vents plus ou moins violents, cette perturbation brasse l'étang de manière forcée. Cette convection mécanique amène en profondeur les calories accumulées précédemment dans la couche superficielle. Le moine soutire alors à l'étang une eau réchauffée et alimente ainsi l'émissaire. L'écart est donc élevé entre la température du cours d'eau entrant, qui est à son minimum estival, et celle du cours d'eau sortant, qui n'est pas loin d'être à son maximum. C'est un important réchauffement absolu du ruisseau par l'étang à moine qui se produit. L'écart tend même à s'accroître pendant l'avancée de la perturbation, car le ruisseau d'amont continue de se refroidir plus rapidement que la colonne d'eau de

l'étang, devenue homotherme, dont le brassage s'accompagne d'une lente diminution des températures.

Une autre famille de minima du cours d'eau tributaire est celle des températures assez fraîches qui arrivent en période calme, anticyclonique, au petit matin, du fait du rayonnement de la nuit claire. Il est vrai que cette perte calorifique atteint aussi la surface de l'étang et provoque chez lui une convection libre, qui fait descendre la thermocline en profondeur tout en l'affaiblissant. Mais, sauf sur les étangs pelliculaires, le phénomène ne va pas jusqu'à la destruction de la stratification. L'hypostagnion se contente de perdre en épaisseur, mais la température du fond de l'étang reste inchangée. C'est ce fort refroidissement nocturne du cours d'eau à l'amont, qui ne se ressent pas à la sortie de l'étang à moine, qui provoque un fort écart relatif entre l'entrée de l'étang et l'aval. L'étang à moine cause alors un réchauffement relatif du cours d'eau, au sens où c'est le refroidissement de l'amont pour une couche profonde de l'étang inchangée qui provoque la grande différence de température.

Pendant la saison froide, les processus sont autres. Les minima les plus prononcés du cours d'eau de l'amont donnent à l'eau une température proche de 0 °C. Pendant ces mêmes périodes, l'étang est gelé ou, au moins, subit une stratification inverse assez stable. Une eau proche de la température de densité maximale est alors soutirée en profondeur par le moine, provoquant un réchauffement du cours d'eau pouvant approcher 4 °C pendant quelques jours, élevant ainsi les minima. A l'échelle des moyennes mensuelles, cependant, les périodes de brassage hivernal dominant dans les régions de climat tempéré hyperocéanique du Centre-Ouest de la France, si bien que l'étang à moine refroidit légèrement l'eau de décembre à février.

4.2. Discussion hydrographique : une propagation des minima diurnes par l'incapacité de l'émissaire à refroidir une eau nocturne pendant la journée

A partir du point d'influence maximale de l'étang, correspondant au système de sortie d'eau, le cours d'eau émissaire tend à reprendre progressivement son état initial, selon une distance qui dépend des conditions climatiques, des relations avec les nappes souterraines et de l'apport des affluents. Leur rôle respectif et les distances de rétablissement ont déjà été étudiées par ailleurs (Touchart, 2007, Touchart et Bartout, 2010).

L'intérêt est ici d'insister sur le fait que ce sont les minima réchauffés qui se propagent le plus loin. Le refroidissement nocturne anticyclonique, qui touche rapidement le ruisseau en amont de l'étang, ne parvient pas à faire baisser significativement la température de la rivière à plusieurs kilomètres en aval de la digue. En effet, l'étang à moine a agi entre les deux. Or, lors de ces périodes estivales de temps atmosphérique calme et ensoleillé, l'étang est durablement stratifié, si bien que le moine fournit une eau à température stable, qui n'est presque pas plus froide à la fin de la nuit qu'à la fin de la journée. Cette eau matinale relativement chaude ne parvient pas à se refroidir dans l'émissaire, car elle y coule aux heures de la journée ; nous émettons ici l'hypothèse que la cause essentielle en est le décalage temporel, faisant que l'écart entre la sortie et l'entrée de l'étang est maximal au petit matin, qui est une grande caractéristique du fonctionnement du moine par rapport à un autre système de sortie d'eau comme le déversoir. En outre, le phénomène est peut-être accentué par l'inertie d'une rivière grossie en aval par d'autres apports.

4.3. Discussion biogéographique : une influence du moine néfaste en été, favorable en hiver

La Truite fario sera choisie comme représentant les espèces sensibles, si bien que les seuils thermiques utilisés dans les calculs seront les siens, d'une part pour le lien entre la température et la vie dans l'eau, jeune et adulte, dont le risque est estival, d'autre part pour les relations entre la température et la vie sous gravier, de la ponte à l'émersion, dont le risque est hivernal.

L'indicateur classique, depuis la mise au point de la biotypologie de J. Verneaux (1973), permettant de quantifier de manière simple le lien entre la température et la biologie, s'appuie sur la température moyenne des trente jours les plus chauds de l'année. Dans le cas de la rivière Gorret, le classement décroissant des 365 moyennes diurnes de l'année 1998 permet de montrer l'importance de l'étang de la Pouge. En amont du plan d'eau, la moyenne des trente moyennes diurnes les plus élevées était de 18,9 °C, tandis qu'en aval du moine elle était de 21,2 °C, soit un réchauffement de 2,3 °C. Cependant, l'écart entre l'aval et l'amont augmente avec la décroissance de la température moyenne diurne, confirmant ainsi que le moine, contrairement à d'autres systèmes d'évacuation des eaux, réchauffe plus les températures estivales les plus basses du cours d'eau que les plus hautes. De ce fait l'indicateur de J. Verneaux minimise l'influence du moine, ou plutôt montre que ce système provoque une influence modérée sur les températures les plus chaudes qui seraient néfastes aux espèces vivantes les plus appréciées.

Deux autres critères simples donnent des indications importantes, si l'on étudie non plus les moyennes diurnes, mais les données horaires. Il s'agit d'une part du seuil léthal, d'autre part du seuil du préférendum. Le premier peut être fixé à 25 °C, le second à 19 °C. L'éventuel dépassement de ces seuils peut être quantifié en termes de nombre total d'heures, de nombre de séquences, de nombre d'heures consécutives de la plus longue séquence et de la plus haute séquence.

Le dépassement du seuil léthal n'a jamais été observé sur nos terrains. Sur les 17 520 heures allant du 1^{er} janvier 1998 à 0h au 31 décembre 1999 à 23h, aucune mesure n'a jamais atteint la valeur de 25 °C, ni en amont ni en aval de l'étang à moine de la Pouge. De même, sur les 669 heures allant du 26 juillet 2007 à 18h au 23 août 2007 à 14h, aucune température n'a jamais été mesurée au-delà de 25 °C, ni en amont ni en aval de l'étang à moine de la Chaume.

En revanche, le moine bouleverse le dépassement du seuil de préférendum thermique. Le nombre total d'heures de dépassement le montre déjà nettement. Sur les 17 520 heures des deux années cumulées de 1998 et 1999, la valeur de 19 °C a été dépassée pendant 5 % du temps en amont de l'étang de la Pouge (962 h au total, soit une moyenne de 481 heures par an), mais pendant 21 % du temps en aval du moine (3 695 h au total, soit une moyenne de 1 848 h par an). A la fin de l'été, on sort du préférendum thermique pendant la quasi-totalité du temps en aval de l'étang à moine. Ainsi, au mois d'août 1999, le dépassement du seuil a été de 33 % du temps en amont de l'étang de la Pouge (246 h sur 744), mais de 100 % du temps en aval du moine. Ces valeurs sont confirmées sur un autre étang, celui de la Chaume. Sur les 669 heures allant du 26 juillet 2007 à 18h au 23 août 2007 à 14h, 10 % des heures ont connu des températures au-dessus de 19 °C en amont, mais 87 % en aval du moine.

L'étude des séquences permet d'affiner le diagnostic. Nous l'avons réalisée pour l'étang de la Pouge pendant l'ensemble de l'année 1998. A l'amont, les 377 h de dépassement du seuil de 19 °C sont réparties en 33 séquences, dont la plus longue fait 61 h (16 % du total). Celle-ci ne correspond pas à la séquence du maximum instantané (22,7°C), lequel prend place dans une séquence de 45 h. A l'aval, les 1 616 h de dépassement sont réparties en 9 séquences, dont la plus longue fait 1 331 h (82 % du total) et correspond aussi à celle du maximum instantané (23 °C). Parmi les 33 séquences de l'amont, 21 d'entre elles coïncident avec des séquences de dépassement à l'aval. On peut considérer que, pendant celles-ci, le moine ne change pas la qualité thermique du cours d'eau.

L'intérêt vient des distorsions dans les deux sens. Lors de 12 courtes séquences, le seuil est dépassé sur le cours d'eau à l'amont, mais il ne l'est pas en aval de l'étang. On peut alors regarder le moine comme un atout qui évite à la rivière de sortir du préférendum. Ces brèves séquences sont toutes concentrées au printemps et au tout début de l'été, puisqu'elles s'échelonnent du 14 mai (une séquence de six heures) au 24 juin (une séquence de sept heures).

A l'inverse, lors de 8 longues séquences, le seuil est dépassé en aval de l'étang, tandis que la rivière reste dans le préférendum à l'amont. Ces séquences sont en majorité décalées vers la fin de l'été, la plus longue durant sans interruption du 5 juillet au 29 août et la dernière de la saison se plaçant du 2 au 11 septembre. Le moine peut alors être considéré comme un système qui dégrade la

qualité de l'eau de la rivière. De juillet à septembre, en empêchant le cours d'eau de se refroidir la nuit et en élevant nettement les minima diurnes, l'étang à moine crée des conditions de permanence d'une eau trop chaude pour les espèces sensibles, alors que le cours d'eau ne connaît que des dépassements thermiques ponctuels et assez courts en amont de l'influence de l'étang.

En hiver, le risque thermique ne concerne plus vraiment la vie en pleine eau des adultes, mais la vie sous gravier, de la ponte à l'émersion. Si l'on s'appuie sur les travaux de D.T. Crisp (1996) et de Jungwirth & Winkler (1984), le développement optimal des œufs et des embryons de Truite se fait pour des températures journalières comprises entre 1 °C et 12 °C. La date de ponte, qui se situe entre novembre et février, possède un maximum en décembre, sachant que la photopériode des jours les plus courts a une grande importance dans le déclenchement du frai. A la suite d'A. Caudron *et al.* (2008), nous choisirons ici arbitrairement le 15 décembre.

Sur la rivière Gorret en amont de l'étang, si le point de départ est fixé au 15 décembre 1997, les 420 degrés-jours séparant la ponte de l'éclosion sont atteints le 24 février 1998 sans aucune moyenne diurne dépassant le seuil de 12 °C. Les 310 degrés-jours suivants, séparant l'éclosion de l'émersion, sont atteints le 1^{er} avril 1998, au moment où deux jours, le 29 mars et le 1^{er} avril, viennent de dépasser de deux dixièmes la moyenne diurne de 12 °C. En aval du moine de l'étang de la Pouge, les 420 degrés-jours séparant la ponte de l'éclosion sont atteints exactement le même jour, le 24 février 1998, dans les mêmes conditions favorables, aucune moyenne diurne ne dépassant le seuil de 12 °C. Les 310 degrés-jours suivants, séparant l'éclosion de l'émersion, sont atteints un jour avant, le 31 mars 1998, dans de meilleures conditions qu'à l'amont, aucune moyenne diurne ne dépassant 12 °C sur cette période. L'hiver suivant confirme l'intérêt du moine. En amont, à partir du 15 décembre 1998, les 420 degrés-jours séparant la ponte de l'éclosion sont atteints le 2 mars 1999 sans aucune moyenne diurne dépassant le seuil de 12 °C. Les 310 degrés-jours suivants, séparant l'éclosion de l'émersion, sont atteints le 4 avril 1999, avec un dépassement lors des quatre derniers jours, atteignant un degré au-dessus du seuil de 12 °C. En aval du moine de l'étang de la Pouge, les 420 degrés-jours sont atteints le 7 mars dans les mêmes conditions favorables, aucune moyenne diurne ne dépassant le seuil de 12 °C. Les 310 degrés-jours suivants sont atteints le 7 avril, dans de meilleures conditions qu'à l'amont, avec dépassement de seulement un dixième le 6 et de trois dixièmes de degré le 7 avril.

On peut donc considérer qu'en amont de l'étang comme en aval, les conditions thermiques de la vie sous gravier embryono-larvaire de la Truite fario sont respectées. Le moine ne détériore aucunement les qualités thermiques de la rivière selon ce critère biogéographique et a même tendance à les améliorer légèrement.

Conclusions et comparaison de l'effet du moine et des autres équipements d'étang

L'intérêt de notre recherche scientifique pour l'aménagement du territoire, en tant que réponse à une demande socio-économique, réclame de conclure non pas sur le seul effet du moine sur les cours d'eau, mais sur la comparaison entre l'influence des étangs à moine et celle des étangs munis d'autre équipements, c'est-à-dire un déversoir de surface ou une dérivation.

Sur le plan descriptif, le moine provoque un réchauffement de l'émissaire d'environ 1 °C en moyenne annuelle, contre 2 °C pour un déversoir de surface. La saison du plus fort réchauffement arrive en août et septembre en aval du moine, alors que c'est en juin et juillet en aval du déversoir. Les maxima estivaux sont presque inchangés par le moine, alors qu'ils sont fortement réchauffés par le déversoir. Au contraire, les minima estivaux sont nettement réchauffés par moine, tandis qu'ils sont presque inchangés par le déversoir. En été, le moine et le déversoir provoquent de forts réchauffements pendant autant d'heures l'un que l'autre. Mais ce sont des minima très réchauffés dans le cas du moine, alors que ce sont des maxima très réchauffés en aval du déversoir. Le moine et le déversoir ont un fonctionnement de sorte que le réchauffement en aval soit net dans les deux cas, seulement un peu modéré par le moine. En fait, la dérivation est le seul système se distinguant

vraiment, luttant efficacement contre le réchauffement. L'étang à moine abaisse des trois quarts l'amplitude diurne du cours d'eau émissaire, cependant que l'étang à déversoir de surface la diminue du quart. Mais la grande différence avec l'étang à déversoir réside dans le fait que le moine abaisse les écarts de températures d'un jour à l'autre (régularisation des moyennes diurnes), tandis que le déversoir les augmente. L'étang à moine peut réchauffer l'eau de l'émissaire jusqu'à une douzaine de kilomètres en aval de la digue, mais, sur de telles distances, ce réchauffement est surtout visible sur les minima, sur les températures du matin. Si les distances d'influence sont à peu près les mêmes en aval d'un déversoir, ce sont en revanche les températures chaudes de l'après-midi qui sont propagées le plus loin.

Les différences précédentes sont expliquées par le fait que l'étang à moine réchauffe la rivière par une eau profonde qui a acquis sa chaleur lors des brassages forcés du plan d'eau. Cette convection mécanique, causée par le vent, se produit postérieurement à l'accumulation de chaleur par l'insolation à la surface de l'étang. C'est ce qui explique le décalage du réchauffement du cours d'eau émissaire sur la fin d'été et l'automne, la réduction du réchauffement moyen total, la réduction du réchauffement des maxima et l'augmentation du réchauffement des minima. Ainsi, les températures de l'air et celles de l'eau de l'émissaire, issue, via le moine, de l'eau profonde de l'étang, ne sont pas corrélées. Au contraire, les températures de l'air et de l'eau d'un émissaire en aval d'un déversoir de surface sont corrélées parce que l'eau de surface de l'étang voit sa chaleur dépendre de l'insolation. Pour simplifier, quand l'eau du ruisseau est chaude en amont de l'étang à déversoir, elle est très chaude en aval, tandis que l'eau du ruisseau en amont et en aval de l'étang à moine subit des variations beaucoup moins simples et prévisibles, puisqu'elles dépendent largement du passage des perturbations atmosphériques et des périodes de vent qui dérangent la stratification thermique de l'étang.

Les conséquences de ces impacts thermiques sur la biogéographie du réseau hydrographique sont suffisamment différenciées pour permettre une comparaison des équipements. En hiver, les étangs, qu'ils soient à moine ou à déversoir, ne détériorent pas la qualité thermique des cours d'eau. Plus précisément, les conditions thermiques de la vie sous gravier embryono-larvaire de la Truite fario sont respectées tant en amont de l'étang qu'en aval. Non seulement, le moine ne dégrade pas les qualités thermiques de la rivière selon ce critère biogéographique, mais il a même tendance à les améliorer légèrement. Le cas de la saison chaude est plus contrasté. En été, le moine tend à interdire le refroidissement nocturne de l'émissaire et à augmenter fortement la température des minima. Il crée ainsi des conditions d'une trop grande chaleur permanente pour les espèces sensibles, alors que le déversoir laisse des fenêtres de refroidissement nocturne en aval, bonnes pour le préférendum thermique. A l'inverse, la température létale n'est jamais atteinte en aval du moine, alors que de forts réchauffements ponctuels dépassant la température létale des espèces les plus sensibles existent en aval du déversoir.

Bibliographie

- Amoros C. & Wade P.M., 1993, « Successions écologiques » in Amoros & Petts, Dir., *Hydrosystèmes fluviaux*. Paris, Masson, 300 p.: 201-231.
- Angelier E., 2000, *Écologie des eaux courantes*. Paris, Techniques et Documentation, 199 p.
- Arrignon J., 1998, *Aménagement piscicole des eaux douces*. Paris, Tec et Doc, 589 p.
- Bachasson B., 1997, *Mise en valeur des étangs*. Paris, Lavoisier, coll. « Tec et Doc », 176 p.
- Bartout P., 2010, *Pour un référentiel des zones humides intérieures de milieu tempéré : l'exemple des étangs en Limousin (France)*. Sarrebruck, Editions Universitaires Européennes, 464 p.
- Bartout P., 2012, *Les étangs du Limousin, des zones humides face au développement durable*. Brive-la-Gaillarde, Les Monédières, 294 p.
- Boch D., 2004, *L'étang d'agrément : étude et maintenance de l'écosystème*. Lyon, Ecole Nationale Vétérinaire, thèse n° 152, Univ. Lyon I Claude Bernard, 287 p.
- Breton B., 2001, *Créer et gérer son étang de pêche*. Paris, Rustica, 128 p.
- Brett J.R., 1956, « Some Principles in the Thermal Requirements of Fishes » *The Quarterly Review of Biology*, 31 : 75-87.

- Brooker M.P., 1981, « The impact of impoundments on the downstream fisheries and general ecology of rivers » *Advances in Applied Biology*, 6: 91-152.
- Brown G.W., 1969, « Predicting temperatures of small streams » *Water Resource Research*, 5(1) : 68-75.
- Burrows R.F., 1967, « Water temperature requirements for maximum productivity of salmon » in Eldridge E.F., Ed, *Water temperature, influences, effects and controls*. Portland, US Department on the Interior Federal Water Pollution Control Administration, Proceedings of the 12th Pacific Northwest Symposium on water pollution research, 157 p. : 29-34.
- Calow P. & Petts, 1992, *The rivers handbook : hydrological and ecological principles*. London, Blackwell Scientific Publ., vol.1, 526 p.
- Caudron A., Vigier L. & Catinaud L., 2008, « L'utilisation des suivis thermiques annuels pour compléter les diagnostics piscicoles sur les cours d'eau à truites (*Salmo trutta* L.) » in Fédération Nationale de la Pêche, *Gestion des ressources piscicoles et restauration morphologique des milieux*. Périgueux, Les Journées Nationales d'Echanges Techniques, 14 et 15 octobre, non paginé.
- Crisp D.T., 1996, « Environmental requirements of common riverine European Salmonid fish species in fresh water with particular reference to physical and chemical aspects » *Hydrobiologia*, 323 (3) : 201-221.
- Dajoz R., 1985, *Précis d'écologie*. Paris, Dunod, 5^e éd., 505 p.
- Denardou L.M., 1987, *Etang de la Pouge, construction de la digue*. DDAF Haute-Vienne, Syndicat Intercommunal d'AEP Vienne-Briançon-Gorre, 9 p.
- Fliriden L., 2001, *Suivi thermique de la Vauvre (36), été 2000*. Stage de DEUST de l'Univ. Aix-Marseille III à la FDAAPPMA de l'Indre, 49 p.
- Géonat, Coord., 2008, *Guide de gestion durable de l'étang en Limousin*. Limoges, Conseil Régional du Limousin, 79 p.
- Gisclard F., 1985, *Etude de la situation actuelle de l'aquaculture d'étangs du Limousin*. Limoges, SRAE Limousin, 45 p.
- Harper P.-P., 1995, « Croissance et dynamique des populations d'invertébrés benthiques » in Pourriot R. & Meybeck M., Dir., *Limnologie Générale*. Paris, Masson, 956 p. : 368-388.
- Huet M., 1970, *Traité de pisciculture*. Bruxelles, Ch. de Wyngaert, 4^e éd., 718 p.
- Jungwirth M. & Winkler H., 1984, « The temperature dependence of embryonic development of grayling (*Tymallus thumallus*), Danube salmon (*Hucho hucho*), Arctic char (*Salvelinus alpinus*) and brown trout (*Salmo trutta fario*) » *Aquaculture*, 38 : 315-327.
- Labroue L., Capblanc J. & Dauta A., 1995, « Cycle des nutriments : l'azote et le phosphore » in Pourriot R. & Meybeck M., Dir., *Limnologie Générale*. Paris, Masson, 956 p. : 727-764.
- Mouillé J., 1982, *Influence des plans d'eau sur les eaux courantes superficielles*. Metz, SRAE Lorraine, 38 p.
- Palisson A., 1972, *Influence de la présence d'étangs ou enclos de pêche sur les caractères physico-chimiques (températures en particulier) et hydrobiologiques d'un cours d'eau. Cas du Saint-Florent, affluent de la Mortagne (Vosges)*. Metz, SRAE Lorraine, 27 p.
- Schlumberger O., 2002, *Mémento de pisciculture d'étang*. Cachan, Tec et Doc, Cemagref, 4^e éd., 238 p.
- Smith K., 1972, « River water temperature – an environment review » *Scottish Geographical Magazine*, 88 : 211-220.
- Touchart L., 2002, *Limnologie physique et dynamique, une géographie des lacs et des étangs*. Paris, L'Harmattan, 395 p.
- Touchart L., 2007, « L'étang et la température de l'eau : un ensemble d'impacts géographiques » in *Géographie de l'étang, des théories globales aux pratiques locales*. Paris, L'Harmattan, 228 p. : 119-156.
- Touchart L. & Bartout P., 2010, « The influence of monk equipped ponds on the quality of basin head streams, the example of water temperature in Limousin and Berry (France) » *Lakes, reservoirs and Ponds, Romanian Journal of Limnology*, 4 : 81-108.
- Touchart L. & Bartout P., 2011, « La gestion du risque thermique en étang : le cas de la dérivation » *Riscuri și catastrofe*. Cluj-Napoca, Casa Cărții de Știință, vol. 9, an X, n° 1 : 149-161.
- Trintignac P. & Kerléo V., 2004, *Impact des étangs à gestion piscicole sur l'environnement*. Nantes, Syndicat Mixte pour le Développement de l'Aquaculture et de la Pêche en Pays de Loire, 59 p.
- Truesdale G.A., Downing A.L. & Lowden G.F., 1955, « The solubility of oxygen in pure water and sea-water » *Journal of Applied Chemistry*, 5 : 53-62.
- Vannote R.L., 1980, « Thermal heterogeneity of river systems » *The American Naturalist*, 115 : 667-695.
- Verneaux J., 1973, *Cours d'eau de Franche-Comté (Massif du Jura). Recherches écologiques sur le réseau hydrographique du Doubs. Essai de biotypologie*. Université de Besançon, thèse d'Etat, 257 p.
- Webb B.W. & Walling D.E., 1996, « Long-term variability in the thermal impact of river impoundment and regulation » *Applied Geography*, 16(3) : 211-223.
- Webb B.W. & Walling D.E., 1997, « Complex summer water temperature behavior below a UK regulating reservoir » *Regulated Rivers : Research and Management*, 13(5) : 463-477.
- Williams O.O., 1968, « Reservoir effect on downstream water temperatures in the upper Delaware river basin » *United States Geological Survey professional Paper*, 600B : 195-199.