Norois

Environnement, aménagement, société

246 | 2018

Eaux, marais, lac, étang, pêche

Le centre thermique, nouvel outil de compréhension du bilan thermique et de l'évolution spatio-temporelle de la température d'un étang ?

The heat center: a new tool for understanding a pond's heat budget and the temporal and spatial changes in its temperature?

Quentin Choffel, Laurent Touchart, Pascal Bartout et Mohammad Al Domany

Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/norois/6350>

DOI : 10.4000/norois.6350

ISBN : 978-2-7535-7539-4

ISSN : 1760-8546

Éditeur

Presses universitaires de Rennes

Édition imprimée

Date de publication : 6 juin 2018

Pagination : 57-73

ISBN : 978-2-7535-7537-0

ISSN : 0029-182X

Référence électronique

Quentin Choffel, Laurent Touchart, Pascal Bartout et Mohammad Al Domany, « Le centre thermique, nouvel outil de compréhension du bilan thermique et de l'évolution spatio-temporelle de la température d'un étang ? », *Norois* [En ligne], 246 | 2018, mis en ligne le 20 juin 2020, consulté le 14 janvier 2022. URL : <http://journals.openedition.org/norois/6350> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/norois.6350>

Le centre thermique, nouvel outil de compréhension du bilan thermique et de l'évolution spatio-temporelle de la température d'un étang ?

*The Heat Center: A New Tool for Understanding a Pond's Heat Budget
and the Temporal and Spatial Changes in its Temperature?*

Quentin CHOFFEL^{a*}, Laurent TOUCHART^a, Pascal BARTOUT^a
et Mohammad AL DOMANY^a

*Auteur correspondant : Tel : +33 7 86 40 41 02

^a Laboratoire CEDETE EA1210 – université d'Orléans, 10 rue de Tours, 45 065 ORLÉANS Cedex 2, France. (quentin.choffel@etu.univ-orleans.fr) (laurent.touchart@univ-orleans.fr) (pascal.bartout@univ-orleans.fr) (mohammad-al-domany@hotmail.com)

Résumé : De nombreuses études ont été effectuées sur l'impact thermique des plans d'eau sur les cours d'eau. Sur les têtes de bassin hydrographiques, l'attention est généralement portée aux cours d'eau, laissant de côté la dynamique interne au plan d'eau. Or, pour les étangs, classés polymictiques discontinus, où les brassages alternent à l'échelle de quelques jours avec les phases de stratification thermique, la connaissance de la dynamique du plan d'eau est fondamentale dans la compréhension de l'évolution amont-aval de la température au sein d'un bassin versant. La présente étude adopte une approche limnosystémique afin de comprendre la dynamique annuelle des étangs en tête de bassin. Pour l'étang multilobé de la Ramade (Puy de Dôme), les écarts de chaleur entre la surface et le fond dépassent les 13 °C pendant certaines périodes, tandis qu'ils peuvent atteindre les 7 °C de différence spatiale entre ses bassins. L'approche spatiale de la température de l'eau permet de faire ressortir de nouveaux indicateurs, tel que le centre thermique. L'étude de son évolution est un moyen efficace à la compréhension globale de la répartition de chaleur au sein du plan d'eau, dans l'espace et dans le temps. Par la forte disparité spatiale de température des étangs, représentée dans le centre thermique, des intérêts de gestion forts émanent de ces problématiques. La modification possible de la position de la sortie d'eau ainsi que des aménagements pourraient permettre de limiter l'influence thermique de l'étang, au centre du système lotique. L'étude d'un grand étang influencé par des courses du vent longues et un très petit étang influencé par un effet d'abris topographique et végétal montrent différentes possibilités de variation spatiale de la température.

Abstract: Many studies have focused on the thermal impact of waterbodies on downstream waterways. With respect to headwaters, interest has tended to focus on streams, neglecting the internal dynamics of waterbodies. For ponds, defined as discontinuous polymictic waterbodies with a maximum depth of less than 6 m (19.7 ft) and an area of less than 100 ha (250 acres), the mixing and stratification stages frequently alternate. Therefore, knowledge of a waterbody's dynamics is key to understanding the upstream-downstream temperature trends within a drainage basin. This study is based on a limnosystemic approach in order to study the annual thermal dynamics of two ponds located on headwaters. The first, Étang de La Ramade (La Ramade Pond), in the French département of Puy-de-Dôme in Auvergne, is a pond of 62 ha (153 acres), with a mean depth of 1,1 m (3.6 ft) and a maximum depth of 3,5 m (11.5 ft) (figure 1). Its morphology lends itself to significant spatial variations in temperature. The second pond is the Étang de Rilhac (Rilhac Pond), located close to Limoges in the French Department of Haute-Vienne (Limousin). This is a 0.4-ha (1-acre) pond, with a maximum depth of 4,2 m (13.8 ft) and a mean depth of 2 m (6.6 ft). Rilhac Pond is representative of small headwater ponds, damming a small valley. In order to measure the temperature within the pond, the methodology implemented uses a number of chains hung on a flotation device, with data loggers to measure the

temperature every hour and every 25 cm (10 in.) from the surface to the bottom, at six different locations. The heat-content approach, which multiplies the temperature recorded by the volume of each layer of a column of water, takes account of all factors – internal and external – that influence the waterbody temperature. The temperature can vary vertically by up to 13 °C (23 °F) between the surface and the bottom, with differences of up to 7 °C (13 °F) between one measuring location and another. Adopting a geographical approach to water temperature makes it possible to highlight certain new indicators such as the heat center. Studying changes in the heat center is useful in gaining an overall comprehension of the spatial and temporal temperature trends within the waterbody. Heat-center variations can be significant, and depend on a number of factors, such as the stratification and mixing of the water column and the temperature distribution within the waterbody. Latitudinal, longitudinal and depth variations in the heat center can be analyzed either separately – so as to obtain specific data for each – or all together, for a comprehensive overview. The variations in the dynamics of a pond's different sub-basins in comparison with the central part of the pond can be expressed through the heat center. This new indicator may have a number of benefits in the field of pond management – allowing, for example, outflow locations to be modified or correctly selected, and surrounding areas to be easily be adapted in order to reduce a pond's effect on a stream system.

Mots clés : étang – tête de bassin – température de l'eau – aménagement fluvial – maîtrise de l'eau

Keywords: pond – headwaters – water temperature – hydraulic engineering – water control

INTRODUCTION

Les étangs sont considérés ici comme des plans d'eau artificiels peu profonds (inférieurs à 6 mètres), et de faible superficie (moins de 100 ha), souvent situés en tête de bassin hydrographique. Nombres d'entre eux ont été établis depuis des siècles dans le lit mineur des cours d'eau afin de maîtriser une arrivée d'eau plus ou moins constante. Ces plans d'eau sont des masses d'eau stagnantes, dans le sens hydrologique, dont le système et la dynamique thermique sont différents des cours d'eau. Par leur stratification thermique estivale, ils sont à même de perturber le réseau hydrographique sur lequel ils sont implantés.

La grande majorité des études françaises et plus globalement européennes suivent une approche hydrosystémique centrée sur le cours d'eau, avec des mesures en amont et en aval du plan d'eau sans chercher à comprendre le fonctionnement interne au plan d'eau, juste à en quantifier les impacts. Une approche limnosystémique propose une grille d'analyse centrée sur le plan d'eau, méthode qui adjoint au biotope lacustre la compréhension des relations cours d'eau amont-plan d'eau, ainsi que celles plan d'eau-cours d'eau aval (Touchart et Bartout, 2018). L'étude limno-centrée considère le plan d'eau à la fois comme un aval collecteur et un amont moteur du réseau hydrographique. Parmi ces études, quelques-unes, en France, se sont focalisées sur les relations entre les plans d'eau et les cours d'eau par une approche thermique (Touchart, 2002 ; Savy, 2005 ; Poirel *et al.*, 2011).

D'un point de vue méthodologique, la grande majorité des mesures thermiques en limnologie est effectuée sur une seule verticale, généralement au droit de la plus grande profondeur, postulant leur relative uniformité en plan (Forel, 1892 ; Birge, 1915 ; Hutchinson, 1957 ; Ragotskie, 1978 ; Wetzel, 1981 ; Goldman et Horne, 1983 ; Geller, 1992 ; Ambrosetti et Barbanti, 2001 ; Touchart, 2002 ; 2016). Or, pour les plans d'eau petits, peu profonds et avec un fetch¹ réduit, l'hypothèse d'une température homogène peut produire d'importantes erreurs dans les résultats (Abbasi *et al.*, 2016). Des études sur les grands lacs, comme le Léman par Soullignac *et al.* (2016), mettent en avant que la variation spatiale des indicateurs écologiques peut amener à des erreurs de classification de l'état écologique du plan d'eau. C'est d'autant plus vrai en étang, où le point le plus profond, généralement juste devant la chaussée barrant le ruisseau, est éloigné du centre géométrique de la masse d'eau. L'installation de plusieurs chaînes de thermomètres enregistreurs en continu réparties dans l'étang permet d'analyser les variations spatiales et temporelles de la température dans son intégralité. Le bilan thermique, couplant débit ou volume et température de l'eau semble être l'approche la plus intégratrice des facteurs internes (stratification thermique) et externes (conditions météorologiques) amenés à modifier la température du plan d'eau.

1. Course du vent, en anglais.

À partir du bilan thermique ainsi réalisé, un nouvel indice, appelé « centre thermique », positionné dans les trois dimensions du volume d'eau, est développé dans cet article. Les variations temporelles et spatiales (tant horizontales que verticales) du centre thermique renseignent sur l'évolution de la répartition de chaleur au sein du plan d'eau et des échanges avec les tributaires et l'émissaire. L'enjeu de représentativité, vrai pour les plans d'eau de toutes les tailles et origines, des étangs piscicoles aux grands lacs naturels, se trouve être de discerner le point le plus significatif du volume d'eau, lequel peut servir à choisir le meilleur profil pour un suivi de qualité d'eau. L'enjeu pratique, dans le cas des plans d'eau de barrage artificiels, concerne la localisation la plus pertinente du système de sortie d'eau, tant la profondeur de la prise que son dimensionnement et sa situation latérale dans la chaussée. Enfin, l'enjeu typologique renvoie à la classification des différents plans d'eau, l'étang étant trop souvent opposé au lac sur le critère de l'homogénéité de la masse d'eau chez le premier, l'hétérogénéité fondée sur les discontinuités thermiques chez le second (Loup, 1974). Le nouvel indice proposé doit pouvoir permettre de tracer les variations spatio-temporelles et les multiples ruptures thermiques en étang.

SITES D'ÉTUDE

Deux étangs limousins ont été instrumentés depuis le début de l'année 2016. Le premier, le grand étang de la Ramade se situe dans la Montagne Limousine, sur le plateau de Millevaches au sens large, plus précisément dans son extension périphérique orientale du plateau de la Courtine (figure 1A, B – **planche XIII**). Le contexte hydromorphologique de ces hautes terres granitiques influence les étangs à plusieurs niveaux. La tectonique récente de rajeunissement du massif ancien a provoqué un bombement régional (Désiré-Marchand et Klein, 1986) à l'origine de la divergence hydrographique. La Ramade est ainsi drainée vers la Dordogne, mais confine à la ligne de partage des eaux avec le bassin de la Loire. L'étang ennoie depuis plus de six siècles le confluent entre deux rivières, la Ramade et la Quérade, chacune de rang 3 de Strahler. La chaussée de l'étang barre le rang 4 qui devient le Chavanon plus en aval, à sa confluence avec la Méouzette. Localement, le modelé en creux fait se

succéder des alvéoles (Valadas, 1984), aux fonds plus ou moins tourbeux (Miras, 2004), fermées par des cloisons, qui constituent autant de sites propices à la construction de petits barrages. En arrière de ces alvéoles, de grands étangs festonnés ou multilobés, de profondeur relative assez faible (~1 m) peuvent s'épanouir. Il se trouve que ce sont eux, et d'autres étangs plus petits de ce haut plateau, qui connaissent la plus grande stabilité historique de toute la région limousine (Perpillou, 1940; Adenis *et al.*, 1962) car, alors que bon nombre de plans d'eau avaient disparu ailleurs en Limousin durant la période 1850-1950 (Bartout, 2012) sous l'effet d'assèchements volontaires ou d'abandons, ceux-ci ont pu préserver leur intérêt économique local.

Le second étang sera appelé « étang de Rilhac », car situé sur la commune de Rilhac-Rancon, à une dizaine de kilomètres au nord-est de la ville de Limoges. L'étang est situé sur source, bénéficiant du ruissellement de surface et sub-surface d'un petit bassin versant agricole (figure 2A et C – **planche XIV**). Son exutoire, équipé d'un moine de vidange, se déverse dans le ruisseau du Verrier et sa succession d'étangs en chaîne, puis, par le ruisseau du Palais, dans la Vienne. L'étang de Rilhac a une profondeur relative importante, dépassant 4 m de profondeur maximale, pour une superficie de 0,4 ha (figure 2B – **planche XIV**). Il est représentatif des petits étangs de bas pays Limousin en tête de bassin, formé par le barrage d'un simple vallon encaissé. La présence d'une butte boisée adossée à la partie ouest/sud-ouest de l'étang laisse présager d'une possible influence de la topographie et du couvert forestier sur la répartition de chaleur au sein de l'étang. La lithologie granitique locale a permis la constitution d'un manteau d'altérites perméables, du fait des conditions morphoclimatiques cénozoïques (Peyrat, 1975), favorable au dessin d'un chevelu hydrographique de petite taille et de forte densité, caractéristique des têtes de bassin de cette région.

Le contexte hydroclimatique est celui d'un climat océanique pour l'étang de Rilhac, avec une dégradation de moyenne montagne au niveau de la Ramade. La température de l'air connaît une faible amplitude annuelle, avec un décalage des maxima en août. Les précipitations peuvent concerner l'année entière, bien que le maximum moyen soit de saison froide et le minimum soit estival. Le temps est très variable, ce qui multiplie les possibilités d'alternance de bras-

sage et de stratification des étangs (Touchart, 2001). À ce contexte climatique océanique, la montagne ajoute une diminution des températures et une augmentation des précipitations. Le régime fluvial est pluvio-évaporal océanique, le minimum mensuel survenant en août et le maximum en février. Le comportement est irrégulier entre les années, mais il est moins pondéré en Limousin que dans les régions sédimentaires avoisinantes, les étiages descendant souvent très bas en fin d'été, du fait de l'épuisement des petites nappes contenues dans les altérites.

MATÉRIELS ET MÉTHODOLOGIE

Instrumentation

Des thermomètres enregistreurs subaquatiques ont été installés sur des chaînes en différents endroits du plan d'eau (figure 1D – **planche XIII**; figure 2D – **planche XIV**). Les chaînes sont équipées de thermomètres tous les 25 cm de la surface jusqu'à 1,5 m de profondeur, puis tous les 50 cm jusqu'au fond. Des bouées assurent la flottabilité des chaînes galvanisées dont le poids assure la verticalité. Les thermomètres sont des Tinytags Data Logger 2, d'une résolution de 0,01 °C ainsi que des Hobo Water Temp Pro V2² d'une résolution de 0,02 °C. Avec un enregistrement automatique réglé sur des mesures horaires, cette méthodologie permet une grande précision d'analyse de l'évolution de la température au sein du plan d'eau. Les chaînes de thermomètres constantes sont représentatives d'un bassin de l'étang, dont les limites ont été extraites selon la bathymétrie et la course du vent (Choffel *et al.*, 2017b) (figure 1C – **planche XIII**; figure 2B – **planche XIV**). Les cours d'eau amont et l'émissaire de l'étang de la Ramade sont instrumentés par la Maison de l'Eau et de la Pêche de Creuse avec des thermomètres situés à environ 1 km de l'étang.

Une station météorologique de type Vantage Pro 2 a été installée sur le toit d'une habitation au plus près de l'étang, à environ 50 m du bord, les effets locaux de topographie ou d'abris par la végétation pouvant induire une marge d'erreur conséquente lors de l'utilisation d'une station météo éloignée (Markfort *et al.*, 2012).

Méthodologie du bilan thermique

Le bilan thermique d'un plan d'eau, au sens du « compte des facteurs positifs et négatifs lui amenant et lui enlevant des calories » (Touchart, 2016, p. 144) a été introduit par Forel (1895) puis largement utilisé pour les lacs (Birge et Juday, 1914; Hutchinson, 1957; Stewart, 1973; Ragotzkie, 1978; Potts, 2002) et plus rarement pour les étangs (Touchart, 2002, 2016; Choffel *et al.*, 2017). La méthodologie consiste à multiplier le volume de chaque strate du plan d'eau par sa température respective.

$$H = \frac{1}{A_o} \int_{z_m}^{z_0} C_p * T_{ref} * dV$$

Avec p : densité de l'eau (1 kg/cm³), Cp : chaleur spécifique de l'eau (1 cal/cm²), Ao : superficie du plan d'eau, Tref : température de référence à la profondeur z, dV : volume à la profondeur z.

Cette méthode permet le calcul de multiples bilans thermiques, qu'ils soient annuels en soustrayant le maximum et le minimum (Forel, 1895) ou saisonniers, en soustrayant le maximum de la contenance calorifique à 4 °C (« winter heat income » de Hutchinson, 1957, p. 493 et « summer heat income » de Birge, 1915, p. 167). L'incorporation de données thermiques en continu permet d'augmenter la précision des différents bilans thermiques et de calculer de nouveaux bilans à des échelles plus précises, journalières, diurnes ou même intra-diurnes (Touchart, 2016; Choffel *et al.*, 2017b).

Stabilité de la colonne d'eau et centre thermique

La stratification thermique est le propre des plans d'eau. Sa durée, son intensité et sa profondeur sont des variables importantes pour l'écosystème aquatique. La présence durable d'une forte stratification limite les échanges thermiques et gazeux entre la surface et le fond et peuvent amener à une anoxie des eaux de fond. La thermocline est le point d'inflexion de la courbe convexo-concave de la température fonction de la profondeur, qui peut être calculé comme le point de valeur absolue maximum de la dérivée (qui est aussi la valeur relative la plus basse puisque la fonction est décroissante). Dans

2. 10 thermomètres prêtés par le pôle Plan d'eau de l'IRSTEA, Aix-en-Provence.

les plans d'eau polymictiques discontinus au sens de Lewis (1983), tels que les étangs, la position de la thermocline varie considérablement dans le temps et dans l'espace. La bathymétrie très variable des différents bassins ainsi que leur forme complexe engendrent une variation de la profondeur de la thermocline au sein du plan d'eau. La valeur de différenciation thermique de 1 °C entre la surface et le fond a été choisie (Wetzel, 1983). Le calcul de la stabilité, élaboré par Schmidt (1915), permet d'estimer la résistance de la stratification de la colonne d'eau face au forçage mécanique. Elle peut être exprimée par la formule suivante, modifiée par Idso (1973).

$$St = \frac{g}{As} \int_0^{ZD} (Z - Zv) \rho z Az \delta z$$

Avec g : accélération de la gravité terrestre, As : superficie du plan d'eau, Az : superficie du plan d'eau à la profondeur z, ρz : est la densité de l'eau à la profondeur z, ZD est la profondeur maximale, Zv est la profondeur du centre de gravité du plan d'eau.

Traditionnellement, « le centre de gravité » (Dussart, 1992, p. 158) d'un lac est d'une part une valeur calculée seulement dans la dimension verticale, et d'autre part fondée sur la densité des couches d'eau douce, dont on sait que la relation avec la température est parabolique avec un foyer à 4 °C. Ce qui signifie que la stabilité, au sens de W. Schmidt est d'autant plus forte que la température s'éloigne de ce foyer.

Nous souhaitons proposer ici la notion de « *centre thermique* » d'un plan d'eau, d'une part en prenant en compte non seulement la profondeur mais aussi les deux dimensions horizontales, et d'autre part en exprimant les températures plutôt que la densité qu'elles provoquent. En effet, l'objectif n'est pas ici de travailler sur la stabilité de l'étang et de quantifier l'énergie qu'il faut au vent pour détruire la stratification thermique, mais de valoriser une démarche spatiale permettant de cartographier les isothermes et les discontinuités thermiques, dont la thermocline. Une finalité appliquée de cet exercice sera la localisation des parties préférentielles de sortie d'eau de l'étang pour en améliorer la gestion. Le centre thermique (CT) est calculé à un pas de temps horaire, suivant les données de température, en prenant en compte les profondeurs moyennes des bassins et la profondeur de la

thermocline pour sa position z, alors qu'il repose sur le bilan thermique des bassins pour ses valeurs horizontales.

$$CT \begin{cases} X = (Bt1 * X1 + Bt2 * X2 + Bt3 * X3 + Bt4 * X4) / (Bt1 + Bt2 + Bt3 + Bt4) \\ Y = (Bt1 * Y1 + Bt2 * Y2 + Bt3 * Y3 + Bt4 * Y4) / (Bt1 + Bt2 + Bt3 + Bt4) \\ Z = (Z1 * Pm1 + Z2 * Pm2 + Z3 * Pm3 + Z4 * Pm4) / (Bt1 + Bt2 + Bt3 + Bt4) \end{cases}$$

Avec Bt : bilan thermique, XYZ : coordonnées de chaque thermistor, Pm : profondeur moyenne du bassin.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Analyses de la dynamique thermique temporelle d'un grand étang peu profond

L'étang de la Ramade est un plan d'eau polymictique discontinu alternant les phases de stratification de plusieurs jours et les brassages ponctuels durant la période estivale. Entre le 3 mars 2016 et le 14 mars 2017, les écarts entre les températures de surface et de fond ont atteint au maximum 13,41 °C, avec un écart moyen de 4,60 °C lors des périodes de plus forte stratification, entre le 20 juin et le 26 août 2016. À partir du mois de novembre, l'étang est entièrement brassé et sa température est homogène sur l'ensemble de sa colonne d'eau. De nouvelles stratifications directes journalières se forment au début du printemps 2017, par temps sec et ensoleillé (figure 3). En hiver, l'étang a connu une stratification inverse avec une prise en glace en trois phases : du 16 au 22 novembre, du 1^{er} au 23 décembre et du 28 décembre 2016 au 5 février 2017. La prise en glace la plus importante a duré cinq semaines, avec un écart thermique moyen entre la surface et le fond de -1,86 °C mesuré au centre du plan d'eau.

Le bilan thermique annuel de l'étang de la Ramade est de 2950 cal/cm² avec un maximum de 3082 cal/cm² et un minimum de 132 cal/cm². La courbe d'évolution de la contenance calorifique de l'étang (figure 3) est une sinusoïde entre les deux moments où l'étang est à une homothermie de 4 °C (température de densité maximale) et son maximal calorifique de l'été. « L'apport estival de chaleur » (Dussart, 1992, p. 163) ou le « *summer heat income* » (Birge, 1915, p. 167 ; Hutchinson, 1957, p. 493) anglo-saxon, de l'étang de la Ramade est de 2650 cal/cm², soit un gain moyen de 661 cal/cm²/mois. Sur l'étang de Rilhac, le bilan thermique annuel atteint la valeur

Figure 3 : Évolution horaire de la contenance calorifique dans le temps du 3 mars 2016 au 14 mars 2017
Hourly change in heat content for the period from 3 March 2016 to 14 March 2017

de 3888^3 cal/cm². Les périodes de fortes chaleurs et d'ensoleillement amènent à des gains calorifiques conséquents, à l'inverse d'un temps dépressionnaire et froid enlevant des calories à l'étang.

Les périodes de stratification thermique et de brassage sont largement visibles sur la courbe de la contenance calorifique du plan d'eau (figure 2). Lors de fortes stabilités de la colonne d'eau, le bilan thermique de l'étang augmente considérablement et rapidement, avec un gain pouvant dépasser les 60 cal/cm²/jour au début de l'été. Les phases de stratification thermique isolent la chaleur dans les couches supérieures, représentant un pourcentage élevé du volume pour les plans d'eau peu profonds. À l'inverse, lors de la diffusion des calories en profondeur, le bilan thermique diminue, lié à un réchauffement des couches de fond dont le volume ne représente qu'un faible pourcentage, au détriment de la couche de surface qui perd des calories. L'alternance de stratifications et de brassage permettent l'augmentation forte du bilan thermique par réchauffement des couches de surface, puis de fond. La fin de l'été connaît de fortes valeurs du bilan thermique au-dessus des valeurs de juin, bien que plus éloigné du solstice d'été et donc du maximum de rayonnement solaire. La pluviométrie et les faibles températures de juin, à l'inverse de la fin de saison estivale chaude et sèche, expliquent aussi,

de manière relative, ces valeurs hautes jusqu'à la première moitié du mois de septembre. La première quinzaine de septembre a enregistré des valeurs de températures moyennes supérieures en moyenne de plus de 4 °C à la normale 1981-2010. Ces valeurs semblent être un seuil maximal encore jamais enregistré pour la période août-septembre au vu des conditions climatiques de l'année 2016.

Variations spatiales de la température au sein d'un grand étang

La variation spatiale de la température de l'étang de la Ramade a été analysée sur la période du 3 mars au 14 septembre 2016⁴. La température de surface a un écart moyen semestriel de 0,88 °C sur l'ensemble du plan d'eau, sans prendre en compte la berge et les fonds de baie pouvant augmenter ces écarts⁵. L'écart moyen estival est de 1,37 °C si l'on ne prend compte que les trois mois de juin à août, soit l'équivalent d'un réchauffement moyen estival d'un étang à dérivation sur le cours d'eau aval (Touchart et Bartout, 2011). L'écart instantané maximal a été de 6,31 °C, le 6 juin 2016 entre un minimum thermique au centre de l'étang et un maximum au niveau de la chaussée. La variation spatiale

3. Valeurs prises entre un maximum estival en 2016 et un minimum hivernal en 2017, lié à l'absence de mesures sur la période hivernale de l'année 2016.

4. En raison d'un problème technique la bouée 1, au niveau de la chaussée, il n'est pas possible de prolonger la période d'étude.

5. Les bouées 5 et 6, installées plus tardivement ne sont pas prises en compte dans l'analyse globale de la variation thermique du plan d'eau. Leur localisation dans les zones peu profondes de queues d'étang donne des informations importantes à l'étude globale mais ne peuvent être intégrées pleinement à cause des variations fortes de niveau.

est la plus importante à la surface et décroît en fonction de la profondeur, dépendant de l'épaisseur de la couche de mélange. Les phénomènes d'upwelling et de downwelling, largement étudiés pour les lacs (Birge, 1916; Mortimer, 1952; Imberger et Parker, 1985; Monismith, 1985; Wang *et al.*, 2014) et liés à l'action mécanique du vent sont également présents en étang, causant les principales variations de température dans les couches du métastagnion et de l'hypostagnion⁶.

Étude détaillée d'une journée estivale

La journée du 8 août 2016 est analysée en détail du fait de sa forte variation spatiale et sa représentativité des journées estivales anticycloniques. Un vent léger de nord-ouest souffle en moyenne à 5 km/h au-dessus de la masse d'eau stratifiée. La thermocline est durablement installée, avec des écarts de température entre la surface et le fond atteignant les 5 °C au centre de l'étang et dépassant les 7 °C au niveau de la chaussée. Les températures de surface varient de 22,37 °C au plus faible à la bouée 3 à l'ouest, à 26,4 °C au maximum au niveau de la chaussée. À 50 cm de profondeur, puis à 1 m, les variations de températures sont tout aussi considérables qu'à la surface (figure 4A). Le vent venant d'ouest, nord-ouest, pousse les eaux chaudes superficielles des parties nord et ouest de l'étang vers la rive opposée amenant à un écart thermique horizontal de 4 °C. Ces eaux vont s'enfoncer au contact de la rive pour plonger jusqu'à une profondeur comprise entre 1,25 et 1,5 m. À l'inverse, un phénomène d'upwelling va faire remonter l'eau de fond, plus froide, au niveau des bassins sous le vent, soit les bassins B3 et B4 (figure 4 B).

Bien que le vent soit faible, son action constante sur une masse d'eau peu profonde engendre des variations importantes dans la température de l'eau influençant la profondeur de la thermocline et la stabilité de la masse d'eau. Les forces de stabilité en place sur la colonne d'eau résistent au brassage forcé complet. L'enfoncement des eaux chaudes au niveau de la chaussée entraîne un abaissement de la profondeur de la thermocline et une plus forte stabilité liée à l'augmentation de l'écart thermique

entre la surface et le fond. La thermocline est amenée à osciller à l'intérieur du plan d'eau, pouvant être stable sur une longue période à un point p, mais variant spatialement au sein de l'étang (figure 5). Au niveau de la chaussée, la thermocline est à environ 1,25 m de profondeur. Elle se limite à 0,75 m au centre de l'étang, tandis qu'elle est proche de la surface (0,25 m) dans la partie ouest de l'étang.

Touchart *et al.*, (2014) ont adapté le nombre de Wedderburn, utilisé initialement pour analyser les phénomènes d'upwelling dans l'épilimnion lacustre (Imberger et Parker, 1985), afin d'obtenir la vitesse du vent nécessaire à briser la thermocline. Cette analyse peut être appliquée ici en prenant compte de la différenciation spatiale au sein de l'étang de la Ramade. En ce jour du 8 août 2016, à 18 heures, il faudrait un vent supérieur à 8,11 m/s, soit 29 km/h, pour détruire la stratification au niveau de la chaussée. Cette valeur, conséquente, montre la force de la stratification au point le plus profond de l'étang. Cependant, pour la même action, la vitesse du vent nécessaire dans la partie ouest de l'étang est seulement de 1,9 m/s, soit 6,8 km/h (figure 4D) pour brasser l'étang, tandis qu'elle n'atteint pas les 3 m/s (2,9 m/s) au centre de la masse d'eau.

Analyse du 1^{er} juin 2016 : un étang verticalement homogène en tout point malgré une forte variation spatiale

Les données spatiales en continu sur une année permettent d'analyser des événements d'ordinaire peu ou pas étudiés. Dans la nuit du 30 mai 2016, un vent modéré à fort de nord à nord-est souffle sur le plan d'eau de la Ramade, dont la structure thermique est homogène. Le vent de nord, se renforçant la nuit suivante, induit un refroidissement de l'ensemble de la colonne d'eau du bassin nord, seule zone non abritée par la végétation (figure 6). Le bassin nord est à une température égale à celle de l'air, tandis que le reste de l'étang est 5 à 6 °C au-dessus. Du 30 mai 23 h 00 au 2 juin 20 h 00, l'étang va être verticalement homogène en tout point mais spatialement hétérogène, avec une différence de plus de 6 °C le 1^{er} juin 2016 à 1 h 00 entre le bassin situé le plus au nord et le reste de l'étang (figure 6). De tels phénomènes ont également été mesurés sur de courtes périodes, principalement entre avril et juin, lors d'un vent constant de nord ou nord-est.

6. Couches thermiques du milieu et de fond semblables au métalimnion et hypolimnion développés en lac (Hutchinson, 1957) appliqué aux particularités des étangs (Touchart, 2002)

Figure 4 : Dynamique thermique de l'étang de la Ramade le 8 août 2016 à 18h00. Cartographie de la température (A), vue 2D^{1/2} de la position de la thermocline (B), profils thermiques (C), cartographie de la vitesse du vent nécessaire au brassage de la masse d'eau (m/s) (D).
 Thermal dynamics of La Ramade Pond on 8 August 2016, at 6 p.m. Heat map (A), 2D^{1/2} view of the position of the thermocline (B), heat profiles (C), map of the wind speed necessary for the mixing of waterbodies (m/s) (D).

L'accalmie du vent va permettre un retour au fonctionnement « normal » de l'étang de la Ramade.

Évolution comparée du centre thermique de deux étangs

Le centre thermique est l'indicateur permettant d'étudier les variations spatiales de la température au sein du plan d'eau et de mesurer le point le plus représentatif de la température du plan d'eau. Son analyse peut être effectuée en séparant les variations longitudinales, latitudinales et de profondeur. Le début des phases de stratification par temps calme, quand la courbe de température est proche de celle de la pénétration de la radiation solaire, qui présente

une position de la thermocline proche de la surface, sont suivies par la remontée du centre thermique de l'étang vers le nord pour les deux étangs. Pendant la présence d'une stratification thermique stable et durable (20 juin au 2 juillet 2016), la profondeur du centre thermique varie peu. Lors des phases de diffusion de la chaleur en profondeur, lors de l'épaississement de la couche de mélange par convection forcée, la valeur z du centre thermique de l'étang se déplace vers les zones les plus profondes (figure 7). Cela exprime un déséquilibre entre des bassins peu profonds avec une thermocline proche de la surface, et la masse d'eau profonde de l'étang subissant un enfoncement de la thermocline vers les profondeurs pour l'étang de la Ramade (figure 8A ; B).

Figure 5 : Coupe thermique de l'étang de la Ramade du ruisseau de la Ramade à la chaussée de l'étang, le 8 août 2016 à 18h00.
Heat cross-section of La Ramade Pond, from La Ramade stream to the pond's dam and causeway, on 8 August 2016 at 6 p.m.

Figure 6 : Carte de la variation spatiale de la température de surface (A) de l'étang de la Ramade ainsi qu'une coupe thermique nord-sud (B) le 1^{er} juin à 1 h00.
Map of the spatial variation in temperature at the surface (A) of La Ramade Pond, together with a heat cross-section (B), on 1 June 2016 at 1 a.m.

La Ramade

Etang de Rilhac

Figure 7 : Comparaison des évolutions temporelles du centre thermique en latitude (en haut) et profondeur (en bas) sur les deux étangs étudiés, comparés avec la stabilité de Schmidt (gris)

Temporal changes in the heat center in terms of latitude (above) and depth (below) for the two ponds studied, compared with Schmidt stability (in grey)

Figure 8 : Évolution du centre thermique de l'étang (A) Composante verticale Z journalière (noir) et horaire (gris), (B) latitudinale Y et (C) cartographie XY. Du 3 mars 2016 au 14 septembre 2016.

Heat-center trends: (A) in the vertical dimension Z, at a daily (black) and hourly (grey) scale; (B) in the latitudinal dimension Y; and (C) across the area XY. Period from 3 March 2016 to 14 September 2016.

Sur le grand étang de la Ramade, une valeur du centre thermique de profondeur égale à -1,05 représente généralement un brassage simultané de l'ensemble de l'étang, en tout point de mesure, alors que la valeur de -0,94 exprime une similarité dans la profondeur de la thermocline aux quatre points de mesure. Les quelques valeurs de centre thermique de latitude très basses sont liées à des phénomènes ponctuels de refroidissement important du bassin nord, dont la journée du 1^{er} juin 2016 en est un parfait exemple (figure 8B). L'amplitude du centre thermique est de 60 cm dans sa composante verticale, 110 m en latitude et est légèrement supérieur à 17 m en longitude. L'amplitude z de 60 cm représente une variation de 20 % de la profondeur maximale du plan d'eau, 54 % de sa profondeur moyenne (figure 8). La dynamique des variations spatiales est exprimée à l'aide du centre thermique et de son évolution dans l'espace et dans le temps. Le bassin ouest suit une dynamique semblable au centre de l'étang, légèrement influencée par la bathymétrie. Le nord de l'étang, quant à lui, a une dynamique plus autonome et sa réaction face aux forçages externes peut être distincte du reste de l'étang. Son volume important lui permet d'impulser les échanges de

chaleur entre les bassins et, plus largement, entre le cours d'eau et le plan d'eau.

Sur l'étang de Rilhac, les données thermiques ont montré que la bouée localisée dans la zone ensoleillée, a une température moyenne supérieure aux deux autres bouées de 1,04 °C⁷, bien qu'elles soient toutes situées dans le même bassin bathymétrique. La température maximale à la bouée au soleil est de 31 °C, dépassant les 30 °C à 3 reprises, tandis que cette valeur seuil n'est pas atteinte pour les deux autres bouées (maxima respectifs de 29,3 °C et 29,6 °C). L'étude du centre thermique peut permettre d'analyser la dynamique spatiale de la température de ce petit étang limousin. Le centre thermique de l'étang de Rilhac a une dynamique particulière, influencée par la présence de la butte boisée, favorisant l'effet d'abri topographique et végétal par ombrage. La variation verticale du centre thermique est faible (figure 9A), du fait de la profondeur maximale similaire entre les trois bassins délimités. L'amplitude verticale est de 45 cm, soit une variation de 23 % de sa profondeur moyenne et de 10,7 % de sa profondeur maximale. Le centre ther-

7. Données sur la période estivale, du 1^{er} juin au 30 septembre 2016.

mique a une tendance régulière vers le nord et donc la partie ensoleillée, commencée dès la fin du mois de mai et les premières stratifications. Il est décalé vers le nord-est jusqu'à la fin du mois de juillet, avant d'inverser légèrement la tendance début août (figure 9B). La variation de sa profondeur est plus régulière que celui de la Ramade, lié à une plus forte stabilité et des phases de stratification plus durables. L'accumulation de chaleur est la plus importante vers le nord-est de l'étang et notamment vers la sortie d'eau de l'étang (figure 9C). Le décalage entre le centre de gravité et les centres thermiques est important, malgré la faible superficie du plan d'eau. L'amplitude spatiale, bien que présente, est réduite par la très faible superficie du plan d'eau.

LE CENTRE THERMIQUE, UN APPUI À LA PRÉCISION SPATIALE DES MESURES

À l'image de l'étude des variabilités spatiales des différents indicateurs écologiques sur le lac Léman par Soullignac *et al.* (2016), la représentativité du point de mesure, d'ordinaire situé à l'endroit le plus profond, peut être questionnée (Choffel *et al.*, 2017b). L'hétérogénéité spatiale de certains paramètres entraîne des erreurs d'appréciations de l'état écologique du plan d'eau. C'est d'autant plus le cas

en étang, où le point le plus profond est localisé au pied de la chaussée, parfois éloigné du centre géométrique. La variation thermique dans sa composante temporelle en premier lieu entraîne des difficultés de suivis des plans d'eau peu profonds. Le changement rapide de température ainsi que la faiblesse de la stratification thermique (et donc également chimique) peuvent entraîner des erreurs importantes suivant la période de la mesure. Des mesures continues restent l'idéal pour les plans d'eau polymictiques. En leur absence, la question de la pertinence d'une mesure saisonnière est remise en question. D'un point de vue spatial, les variations sont plus faibles mais restent effectives. À certains moments, les variations peuvent dépasser les 5 °C entre un point de mesure, à la plus grande profondeur, et une grande partie de l'étang. Les variations thermiques ne se limitent pas aux zones littorales ou aux fonds de baies. Des bassins avec des volumes conséquents connaissent des différences spatiales entre eux. Cet indicateur prend tout son sens pour les plans d'eau artificiels où l'emplacement de la sortie d'eau peut être modifié. Lorsque l'on sait que l'écart thermique moyen de 1,5 °C entre la digue et le centre de l'étang de la Ramade est semblable à l'effet positif d'une dérivation (Touchart et Bartout, 2011), le changement de localisation de sortie d'eau ou une adaptation de cette dernière peut être un

Figure 9 : Évolution du centre thermique de l'étang (A) Composante verticale Z journalière (noir) et horaire (gris), (B) latitudinale Y et (C) cartographie XY. Du 4 mai 2016 au 2 août 2016.

Heat-center trends: (A) in the vertical dimension Z, at a daily (black) and hourly (grey) scale; (B) in the latitudinal dimension Y; and (C) across the area XY. Period from 4 May 2016 to 2 August 2016.

dispositif léger, bénéfique à l'ensemble du système hydrographique, de l'étang au cours d'eau.

L'ANALYSE INTERNE D'UN ÉTANG POUR LA COMPRÉHENSION DES ÉCHANGES AMONT AVAL

L'évolution spatiale du centre thermique est un indicateur de la répartition de chaleur au sein du plan d'eau. Lorsque la chaleur est concentrée au niveau du déversoir, le centre de gravité descend vers le sud. C'est lors de ces épisodes que l'écart thermique entre les cours d'eau amont et aval est positivement le plus élevé (Choffel *et al.*, 2017a). Les cours d'eau amont étant éloignés du centre thermique du plan d'eau, tandis que ce dernier est proche de la sortie d'eau de l'étang. Pour les grands étangs comme celui de la Ramade, le vent est le principal facteur de répartition de la chaleur en profondeur et dans la dimension horizontale. Son action se propage en profondeur, avec un réchauffement du métastagnion, atteignant fréquemment les strates d'eau entre 1 m et 1,5 m pour l'étang de la Ramade. Pour les petits plans d'eau, le vent à lui seul a un rôle moindre lié à un fetch très faible et à un développement du trait de côte généralement faible également. L'effet d'abris, par la végétation rivulaire ou la topographie locale, peut ainsi perturber la diffusion de chaleur (Markfort *et al.*, 2010). Le centre thermique donne une bonne indication du comportement du plan d'eau, notamment lors de la période estivale, soit lors des périodes les plus propices au réchauffement de l'eau. L'approche limnosystémique place le plan d'eau au cœur des échanges avec le réseau hydrographique. Il est un aval récepteur et un amont moteur. La compréhension de la dynamique thermique interne au plan d'eau, replacé dans un contexte de réseau hydrographique, permet la compréhension de l'ensemble du système. Les phases de réchauffement du système lotique par le système lentique peuvent être anticipées en fonction des conditions météorologiques. La connaissance au préalable de la réactivité de différents étangs, notamment par leur morphologie, est fondamentale pour la bonne gestion de ces milieux. L'étude de deux cas opposés, un petit et un très grand étang, borde les limites des étangs. Il sera intéressant de rajouter un étang intermédiaire à l'étude, en cours d'instrumentalisation, afin de couvrir une plus large gamme d'exemples.

La température d'un plan d'eau peut avoir une forte variabilité spatiale et le point le plus représentatif peut être exprimé par le centre thermique. Ce dernier permet d'avoir une connaissance plus précise de la zone la plus adéquate au monitoring et à la prise de données continues ou ponctuelles.

CONCLUSION

L'étang de la Ramade est représentatif des grands étangs peu profonds multilobés de têtes de bassins. Les variations spatiales de la température sont ponctuellement fortes, avec des écarts pouvant atteindre 7 °C entre les bassins, sans prendre en compte les températures du littoral. Cette hétérogénéité spatiale suit des tendances en fonction de la vitesse et de la direction du vent, de l'abris par la végétation ou encore de la profondeur du bassin. Quant au second étang, situé sur la commune de Rilhac-Rancon, il est représentatif des petits étangs profonds de fonds de vallées limousines. La présence d'une butte végétalisée entraîne des variations spatiales de la température par des phénomènes d'ombrage. Ces variations sont amplifiées au cours de la période estivale et peuvent être conséquentes. La géographie thermique du plan d'eau, aux échelles verticales et horizontales est exprimée ici à travers le centre thermique, dont l'évolution dans le temps et l'espace est un indicateur de la dynamique interne du plan d'eau. Il montre la forte variabilité spatiale de la température et de la stabilité, exprimée par les variations de sa position verticale et horizontale. La position du centre thermique est un indicateur de localisation des centres de chaleurs du plan d'eau et donc de l'influence thermique du plan d'eau sur le cours d'eau aval. Les écarts moyens spatiaux pouvant dépasser les 1,5 °C sur la période estivale, la question de la localisation de la sortie d'eau peut être un moyen de limiter l'impact thermique sur le cours d'eau aval. Ces écarts sont présents sur des grands plans d'eau, favorisés par l'action du vent, mais également sur les plus petits lorsqu'il y a une présence hétérogène de végétation ou d'abris par la topographie locale. Sur ces plans d'eau, des méthodes peu onéreuses devraient permettre une réduction notable de la chaleur déversée dans le cours d'eau, à l'instar de l'établissement d'une dérivation ou d'un moine de vidange.

Bibliographie

- ABBASI A., ANNOR F., VAN DE GIESEN N., 2016. Investigation of Temperature Dynamics in Small and Shallow Reservoirs, Case Study: Lake Binaba, Upper East Region of Ghana, *Water*, 8(3), 84 [https://doi.org/10.3390/w8030084].
- ADENIS A., COUSTEIX P., PERPILLOU A., 1962. *Géographie du Limousin*. Guéret, Presses du Massif Central, 2^e édition, 48 p.
- ALLOTT N.A., 1986. Temperature, oxygen and heat-budgets of six small western Irish lakes. *Freshwater Biology*, 16(2), p. 145-154 [doi.org/10.1111/j.1365-2427.1986.tb00959.x].
- AMBROSETTI W., BARBANTI L., 2002. Physical limnology of Italian lakes. 2. Relationships between morphometric parameters, stability and Birgean work. *Journal of Limnology*, p. 159-216.
- AZAROUAL A., BELTRANDO G., TOUCHART L., 2014. Relations entre les plans d'eau (lacs et étangs) et climats locaux : exemple des étangs de Brenne (Indre – France). XXVII^e Colloque de l'AIC, Climat : système & interactions, Dijon.
- BARTOUT P., 2012. *Les étangs du Limousin : des zones humides face au développement durable*. Brive-la-Gaillarde, Les Monédières, 250 p + annexes.
- BARTOUT P., TOUCHART L., 2013. L'inventaire des plans d'eau français : outil d'une meilleure gestion des eaux de surface. *Annales de géographie*, 691(3), p. 266 [doi.org/10.3917/ag.691.0266].
- BIRGE E.A., 1915. The heat budgets of american and european lakes, *Transactions of the Wisconsin Academy of Sciences, Arts, and Letters*, p. 166-213.
- BIRGE E.A., 1916. The work of the wind in warming a lake. *Transactions of the Wisconsin Academy of Sciences, Arts, and Letters*, XVIII, p. 473-788.
- BIRGE E., JUDAY C., 1914. A Limnological Study of the Finger Lakes of New York. *Bull. US Bur. Fish.*, 32, p. 525-609.
- DUSSART B., 1966. *Limnologie, l'étude des eaux continentales*, Paris, Gauthier-Villars.
- CHOFFEL Q., BARTOUT P., TOUCHART L., AL DOMANY M., 2017. La Ramade, un étang-frontière aux marges de la retenue de Bort-les-Orgues mais au cœur des problématiques environnementales. *Actes du LXXIII^e congrès de la Fédération des sociétés savantes du centre de la France*, Guéret 19-20-21 mai 2017, p. 19-29.
- CHOFFEL Q., TOUCHART L., BARTOUT P., AL DOMANY M., 2017. Temporal and spatial variation in heat content of a french pond. *Geographia Technica*, 12(1), p. 9-22 [doi.org/10.21163/GT_2017.121.02].
- DÉSIRÉ-MARCHAND J., KLEIN C., 1986. Le relief du Limousin. Les avatars d'un géomorphotype, *Noroi*, 129, p. 23-49.
- DUSSART B., 1992. *Limnologie, l'étude des eaux continentales*, Seconde édition, Paris, Gauthier Villard, 681 p.
- FOREL F.A., 1892. *Le Léman, Monographie Limnologique*, Lausanne, F. Rouge, t. I., 744 p.
- GELLER W., 1992. Temperature stratification and related characteristics of Chilean lakes in midsummer. *Aquatic Sciences*, 54 (1), p. 37-57 [doi.org/10.1007/BF00877263].
- GORHAM E., 1964. Morphometric Control of Annual Heat Budgets in Temperate Lakes I. *Limnology and Oceanography*, 9(4), p. 525-529. doi.org/10.4319/lo.1964.9.4.0525
- HORNE A.J., GOLDMAN C.R., 1994. *Limnology*, McGraw-Hill, University of Minnesota, 576 p.
- HUTCHINSON G.E., 1957. *Treatise on Limnology*. John Wiley & sons, INC, Vol. I, New York, 540 p.
- IDSO S.B., 1973. On the concept of lake stability. *Limnology and Oceanography*, 18(4), p. 681-683.
- IMBERGER J., 1985. The diurnal mixed layer I. *Limnology and Oceanography*, 30(4), p. 737-770 https://doi.org/10.4319/lo.1985.30.4.0737.
- IMBERGER J., PARKER G., 1985. Mixed layer dynamics in a lake exposed to a spatially variable wind field. *American Society of Limnology and Oceanography*, 30(3), p. 473-788.
- LEWIS Jr., 1983. A Revised Classification of Lakes Based on Mixing. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40, p. 1779-1787.
- LOUP J., 1974, *Les eaux terrestres*, Paris, Masson, 174 p.
- MAHEU A., SAINT-HILAIRE A., CAISSIE D., EL-JABI N., 2016. Understanding the thermal regime of rivers influenced by small and medium size dams in eastern Canada. *River Research and Applications*, 32 (10), p. 2032-2044 [https://doi.org/10.1002/rra.3046].
- MARKFORT C.D., PEREZ A.L.S., THILL J.W., JASTER D.A., PORTÉ-AGEL F., STEFAN H.G., 2010. Wind sheltering of a lake by a tree canopy or bluff topography. *Water Resources Research*, 46(3), W03530. [https://doi.org/10.1029/2009WR007759].
- MEYBECK M., 1995. Les lacs et leur bassin, in Pourriot R., Meybeck M. (eds), *Limnologie générale*, Masson, Paris, 956 p.
- MIRAS Y., 2004. *L'analyse pollinique du plateau de Millevaches (Massif central) et de sites périphériques limousins et auvergnats : approches des paléoenvironnements, des systèmes agropastoraux et évolution des territoires ruraux*. Thèse de doctorat de Sciences et Vie, Besançon, Université de Franche-Comté, 301 p.
- MONISMITH S.G., 1985. Wind-forced motions in stratified lakes and their effect on mixed-layer shear. *American Society of Limnology and Oceanography*, 30(4), p. 771-783.
- PERPILLOU A., 1940. *Le Limousin, étude de géographie physique régionale*, Chartres, Durand, 257 p.
- PEYRAT J.-M., 1975. Les sols en Limousin et leur perméabilité. *Noroi*, 88(1), p. 639-648.
- POTTS D.J., 2004. *The heat budget of Quesnel lake*. University of British Columbia, Vancouver, Canada, 66 p.
- RAGOTZKIE R.A., 1978. Heat Budgets of Lakes in LERMAN A. (ed.), *Lakes: Chemistry, Geology, Physics*, New York, Springer, 363, p. 1-19.
- SCHMIDT W., 1915. Über den Energiegehalt der Seen. *Int. Rev. Hydrogr. Suppl.*, 7, p. 2-25.
- SAVY B., 2006. *Hydro-limnologie du haut bassin de la Charente : une approche géographique appliquée aux relations lac de barrage – émissaire. La température de l'eau en aval des lacs de Lavaud et Mas Chaban*. Thèse de doctorat en géographie, Université de Limoges, 383 p.
- SOULIGNAC F., DANIS P.-A., BOUFFARD D., CHANUDET V., DAMBRINE E., GUENAND Y., GUILLERMIN B., HARMEL T.,

- IBELINGS B., KIEFER I., TREVISAN D., UITTENBGAARD R., ANNEVILLE O., 2016. Application of Delft3D to evaluate the spatio-temporal variability of Lake Geneva ecological status. *Delft3D user Meeting*, 3 novembre 2016.
- TOUCHART L., 2001. *De la température de l'eau à la géographie des lacs*. Thèse d'HDR en géographie, Université de Limoges, 480 p.
- TOUCHART L., 2002. *Limnologie physique et dynamique*, Paris, L'Harmattan, 395 p.
- TOUCHART L., 2016. Le bilan thermique des étangs : réflexion épistémologique et application aux étangs limousins, *Annales de Géographie*, 708, p. 143-169.
- TOUCHART L., BARTOUT P., 2011. La gestion du risque thermique en étang : le cas de la dérivation. *Riscuri si catastrofe*, nr. X, vol. 9, nr. 1/2011, p. 149-161.
- TOUCHART L., BARTOUT P., 2015. Quel est le volume d'eau contenu dans les étangs limousins et français?, *Physio-Géo. Géographie, physique, et environnement*, 9, p. 111-123 [doi.org/10.4000/physio-geo.4527].
- TOUCHART L., BARTOUT P., 2018. Le limnosystème est-il un concept géographique?, *Annales de Géographie*, 719, p. 29-58.
- TOUCHART L., AZAROUAL A., NEDJAI R., BARTOUT P., ALDOMANY M., MILLOT C., 2014. The stability of the water column in French ponds (Limousin region) by the calculation of the Wedderburn number. *Conference dedicated to the World Meteorological Day and the World Water Day, March 21-22, 2014, Air and water components of the environment*. Cluj-Napoca, Casa Cărții de Stință, 484, p. 8-15.
- VALADAS B., 1984. *Les hautes terres du massif Central français*. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, thèse d'État en géographie, 2 t., 927 p.
- WANG W., XIAO W., CAO C., GAO Z., HU Z., LIU S., LEE X., 2014. Temporal and spatial variations in radiation and energy balance across a large freshwater lake in China, *Journal of Hydrology*, 511, p. 811-824. [https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.012].
- WETZEL R.G., 1983. *Limnology*. Saunders college publishing, Michigan State University, second edition, 860 p.

Figure 1 : Carte de localisation de l'étang de la Ramade au sein de l'inventaire des plans d'eau français (A) et de son bassin versant (B). Carte bathymétrique de l'étang (C) et découpage en bassins (D)
Location map of La Ramade Pond, taken from the french waterbodies inventory (A), and its drainage basin (B). Bathymetric chart of the pond (C), and a diagram of the pond's different sub-basins (D)

Figure 2 : Carte de localisation de l'étang de Rilhac au sein de l'inventaire des plans d'eau français (A) et de son bassin versant (B). Carte bathymétrique de l'étang (C) et découpage en bassins (D)

Location map of Rilhac Pond, taken from the french waterbodies inventory (A), and its drainage basin (B). Bathymetric chart of the pond (C), and a diagram of the pond's different sub-basins (D)