



HAL
open science

La température de l'eau en Limousin et Angoumois : études d'effet et aménagement du territoire

Laurent Touchart

► **To cite this version:**

Laurent Touchart. La température de l'eau en Limousin et Angoumois : études d'effet et aménagement du territoire. Hydrosystèmes, paysages, territoires, Université des Sciences et technologies de Lille, Sep 2001, Lille, France. hal-03317895

HAL Id: hal-03317895

<https://hal.science/hal-03317895v1>

Submitted on 9 Aug 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. (2002) « La température de l'eau en Limousin et Angoumois : études d'effet et aménagement du territoire » *Actes du colloque Hydrosystèmes, paysages, territoires*. Lille, 6-8 septembre 2001, Université des Sciences et Technologies de Lille, 68 p. + 1 CD : résumé dans les actes papier pp. 33-34 + article in-extenso en CD.

Touchart L. (2002) « Water temperature, effects of water bodies and land use planning in Limousin and Angoumois » *Proceedings of the 'Hydrosystems, landscapes, territories' conference*. Lille, September 6-8, 2001, University of Science and Technology of Lille, 68 p. + 1 CD : abstract pp. 33-34 + full paper on CD. (in French).

Version HAL :

Résumé différent (plus long) de celui publié dans les actes en version papier.

Ajout du titre, des mots clefs et du résumé en anglais.

Mise en page de l'article antérieure à celle publiée dans les actes en version CD

Résumé : En conditionnant le fonctionnement trophique des plans d'eau et en déterminant la qualité de leurs émissaires fluviaux, la température de l'eau est au centre des préoccupations environnementales dans les régions barrées de multiples étangs et petits lacs de barrage. En réponse à la demande sociale, l'applicabilité des recherches en géographie limnologique se traduit par des propositions destinées à réduire l'impact des petits plans d'eau sur les cours d'eau, se voulant utiles à l'aménagement des territoires du Limousin et de la Charente limousine. L'auteur fait fonctionner depuis 1997 une trentaine de thermomètres enregistreurs, en amont, à l'intérieur et en aval de lacs de barrage et d'étangs (isolés, en chaîne, à déversoir de surface, à moine), essentiellement dans les bassins de la haute Charente, de la haute Vézère, de la Gorre et de la Glane. Le présent papier s'appuie sur les 800 000 données horaires inédites de température de l'eau de l'ensemble de ces bassins, tout en détaillant plus particulièrement le cas de l'étang de Cieux. Les méthodes de traitement des données sont statistiques, graphiques et cartographiques. Cette recherche expose une nouvelle méthode de détermination de la thermocline et des sauts thermiques par la construction de MNT associant tous les profils thermiques et le calcul de la dérivée directionnelle sur chaque profil. Nos résultats montrent que la stratification thermique des étangs est plus durable qu'il n'était dit jusqu'à présent dans la littérature scientifique. Des thermoclines profondes se mettent en place parfois pendant plusieurs semaines d'affilée. Les thermoclines superficielles sont plus éphémères, mais peuvent être très marquées. Par conséquent, le type d'évacuation d'eau des plans d'eau provoque de grandes différences dans leur l'impact thermique sur les cours d'eau. Les étangs à déversoir de surface, qui sont ceux dont l'influence est la plus forte, réchauffent l'eau des cours d'eau de 2 °C en moyenne annuelle et de 4 à 7 °C en été. Dans le cas du Grand Etang de Cieux, l'impact peut être suivi sur environ 3 km au cœur de l'été, mais l'essentiel du réchauffement disparaît sur le premier kilomètre. Un moine peut être préconisé pour réduire le réchauffement moyen, les réchauffements maxima et l'amplitude diurne. En revanche, ce système a tendance à réchauffer les minima diurnes. A l'échelle saisonnière, le réchauffement en sortie d'un étang à moine est maximal en période de convection mécanique, soit plus souvent en fin d'été. Pour les étangs de moins d'1 m de profondeur, le système d'évacuation importe peu, la tranche d'eau complète étant brassée chaque nuit. Entre 1 et 3,5 m de profondeur, le moine fournit une eau de température assez stable et plutôt bien oxygénée, mais des réchauffements dépassant 5°C peuvent exister pendant une dizaine de jours cumulés. Entre 3,5 et 5,5 m, le moine soutire une eau aux écarts thermiques fortement réduits, légèrement plus chaude que le tributaire mais souvent désoxygénée. L'ajout d'une cascade de réoxygénation est conseillé. Au-delà de 6 m de profondeur, le moine puise une eau hypolimnique, fraîche et stable pendant tout l'été, mais qui aura séjourné au contact de sédiments anoxiques et réduits. Les lacs de barrage, qui ont une superficie plus grande que celle des étangs donc une course du vent plus longue permettant des brassages forcés à

plus grande profondeur, connaissent une stratification saisonnière à partir d'environ 8 m de profondeur dans le cas de la haute Charente. Si le choix est fait de lutter contre la stratification thermique, un injecteur d'air peut être préconisé. La comparaison des températures de l'eau du lac de Lavaud, de fonctionnement libre, et du lac de Mas Chaban, muni d'un déstratificateur, montre que l'eau fluviale provenant du lac artificiellement déstratifié est plus chaude que celle du lac sans injecteur d'air. En revanche, l'intérieur du lac déstratifié est oxygéné de la surface jusqu'au fond.

Abstract: In response to social demand, the applicability of limnogeographical research is reflected in proposals intended to reduce the impact of small dams on streams, useful for land planning of Limousin and Angoumois regions in Western France. Since 1997, the author has operated around thirty recording thermometers, upstream, inside and downstream of small dams, i.e. small reservoirs and large ponds (isolated ponds, series of ponds, ponds with surface weir, ponds equipped with monk), mainly in the hydrographic basins of Upper Charente, Upper Vézère, Gorre and Glane. This paper is based on 800,000 unpublished hourly water temperature data for all of these basins, while more specifically detailing the case of the Pond of Cieux. The data processing methods are statistical, graphic and cartographic. This research exposes a new method of determining the thermocline by DEMs associating all the thermal profiles and calculation of the directional derivative on each profile. Our results show that thermal stratification of ponds is more durable than previously reported in the scientific literature. Deep thermoclines sometimes set in for several weeks at a time. Surface thermoclines are more ephemeral, but can have very strong gradients. Therefore, the type of water discharge from water bodies causes great differences in their thermal impact on streams. Surface weir ponds, which are the most influential ones, warm the stream water by 2 ° C on an annual average and by 4 to 7 ° C in summer. In the case of the Great Pond of Cieux, the impact can be followed for about 3 km in summer, but most of the warming disappears in the first 900 m. A monk can be recommended to reduce mean warming, maximum warming, and diurnal range. On the other hand, this system tends to heat up the diurnal minima. On a seasonal scale, the warming at the outlet of a monk pond is greatest during periods of mechanical convection by wind, more often at the end of summer or in autumn. For ponds less than 1m deep, the drainage system is irrelevant as the entire water column is stirred each night. Between 1 and 3.5 m deep, the monk provides water of fairly stable temperature and rather well oxygenated, but warming exceeding 5 ° C can exist for ten cumulative days. Between 3.5 and 5.5 m, the monk draws water with greatly reduced temperature variations, slightly warmer than the tributary but often deoxygenated. The addition of an oxygenation cascade is recommended. Beyond 6 m of depth, the monk draws hypolimnetic water, fresh and stable throughout the summer, but which will have stayed in contact with anoxic and reduced sediments. The reservoirs, which have a larger area than ponds and therefore a longer fetch allowing forced mixing at greater depth, have a seasonal stratification from about 8 m deep in the case of the high Charente. If the choice is made to prevent the effects of thermal stratification, an air bubble system may be recommended. The comparison of the water temperatures of the Lavaud reservoir, without water aeration, and the temperatures of the Mas Chaban reservoir, equipped with an air bubble system, shows that the stream water coming from the artificially mixed lake is hotter than that coming from the reservoir without an air bubble system. In contrast, the interior of the mixed lake is oxygenated from the top to the bottom.

Mots clefs : étang, lac de barrage, plan d'eau, impact thermique, régime thermique, stratification thermique, moine d'étang, géographie limnologique, bassin de la Glane, étang de Cieux.

Key words: pond, reservoir, small dam, stream temperature, temperature effect, thermal regime, thermal stratification, monk equipped pond, limnogeography.

La température de l'eau en Limousin et Angoumois : études d'effet et aménagement du territoire

Introduction

La température de l'eau conditionne le fonctionnement trophique des plans d'eau et détermine la qualité de leurs émissaires fluviaux. En jouant sur la solubilité des gaz (azote, oxygène), le caractère oxydé ou réduit des dépôts, les échanges entre l'eau et les sédiments, la fixation ou le relargage de nutriments ou de substances toxiques par les particules fines, la stabilité ou le brassage de la colonne d'eau, le fonctionnement anatomique et la répartition spatiale des organismes vivants, la température de l'eau est au centre des préoccupations environnementales dans les régions barrées de multiples réservoirs et plans d'eau. Si la plupart des approches étudient directement les cours d'eau (Eckel, 1951, Ward, 1963, 1974, 1985, Mackichan, 1967, Collings, 1969, Vannote, 1980, Steele, 1982, El-Jabi *et al.*, 1995, Kobayashi *et al.*, 1995, Webb & Walling, 1985, 1988, 1996, 1997, Webb *et al.*, 1996), il a été ici préféré une démarche partant de la source même des perturbations thermiques, le plan d'eau.

Le Limousin, qui compte plus de 10 000 étangs et une cinquantaine de lacs de barrage, tente d'asseoir une part de son activité économique sur le tourisme vert, pour lequel la pêche est un produit d'appel important. Région cristalline qui pompe son eau domestique dans le réseau hydrographique de surface, le Limousin est aussi à l'amont de tous les cours d'eau du centre-ouest de la France, et de la centrale nucléaire de Civaux refroidie par la Vienne. Limitrophe, l'Angoumois voit croître ses besoins en eau d'irrigation et a construit à cet effet deux lacs de barrage sur la haute Charente.

En été, la pêche, surtout quand les Salmonidés sont concernés, réclame une eau fraîche, de même que les pompages d'eau potable et de refroidissement de centrale. En revanche, l'irrigation ne doit pas gêner la germination du maïs par une eau trop froide et le tourisme balnéaire ne la souhaite pas non plus, dans les plans d'eau de plus en plus nombreux à être aménagés.

En réponse à la demande sociale, une trentaine de thermomètres enregistreurs sont placés depuis 1997 dans les plans d'eau et les cours d'eau affluents et effluents du Limousin et de l'Angoumois. Un Système de Gestion de Bases de Données permet de collecter et structurer la mesure thermique en continu. Son extraction conduit à des traitements statistiques à différentes échelles de temps (irrégularité interannuelle, cycle annuel, écarts interdiurnes, cycle diurne).

L'applicabilité de ces recherches est le souci majeur. Il s'agit de fournir quelques éléments de réponse aux questions posées par les gestionnaires et utilisateurs des lacs, des étangs et de leurs émissaires. Quelles sont les différences de température entre l'entrée et la sortie des plans d'eau ? Sur quelle distance se propage l'influence des plans d'eau sur les émissaires ? Faut-il équiper de moines (systèmes d'évacuation profonde qui, à la différence des bondes, fonctionnent en continu) les étangs à déversoir de surface ? La stratification thermique des étangs est-elle, comme il est souvent écrit (Combrouze, 2000), négligeable ou inexistante ? Le réglage des vannes de barrage à plusieurs niveaux est-il une solution permettant de moduler les températures ? Faut-il équiper les lacs de déstratificateurs thermiques artificiels ?

1. Site d'étude

L'instrumentation des hydrosystèmes fluvio-lacustres du Limousin et de ses bordures s'appuie sur des critères de représentativité des plans d'eau choisis et sur les écarts régionaux existant entre chaque bassin témoin (**figure 1**).

Il a été sélectionné une chaîne de petits étangs à déversoirs de surface (celle du Theil et des Garennes – bassin Glane), une chaîne de petits étangs à exutoire mixte (celle de Pranaud – bassin Glane), un vaste étang pelliculaire à déversoir de surface (les Oussines – bassin Vézère), un vaste étang assez peu profond à déversoir de surface (Cieux – bassin Glane), un vaste étang profond à moine (la Pouge – bassin Gorre), deux lacs de taille moyenne à multiples vannes de différents niveaux (Lavaud et Mas Chaban – bassin Charente), une chaîne de grands lacs à vannes de fond (Argentat et les barrages amont de la haute Dordogne).

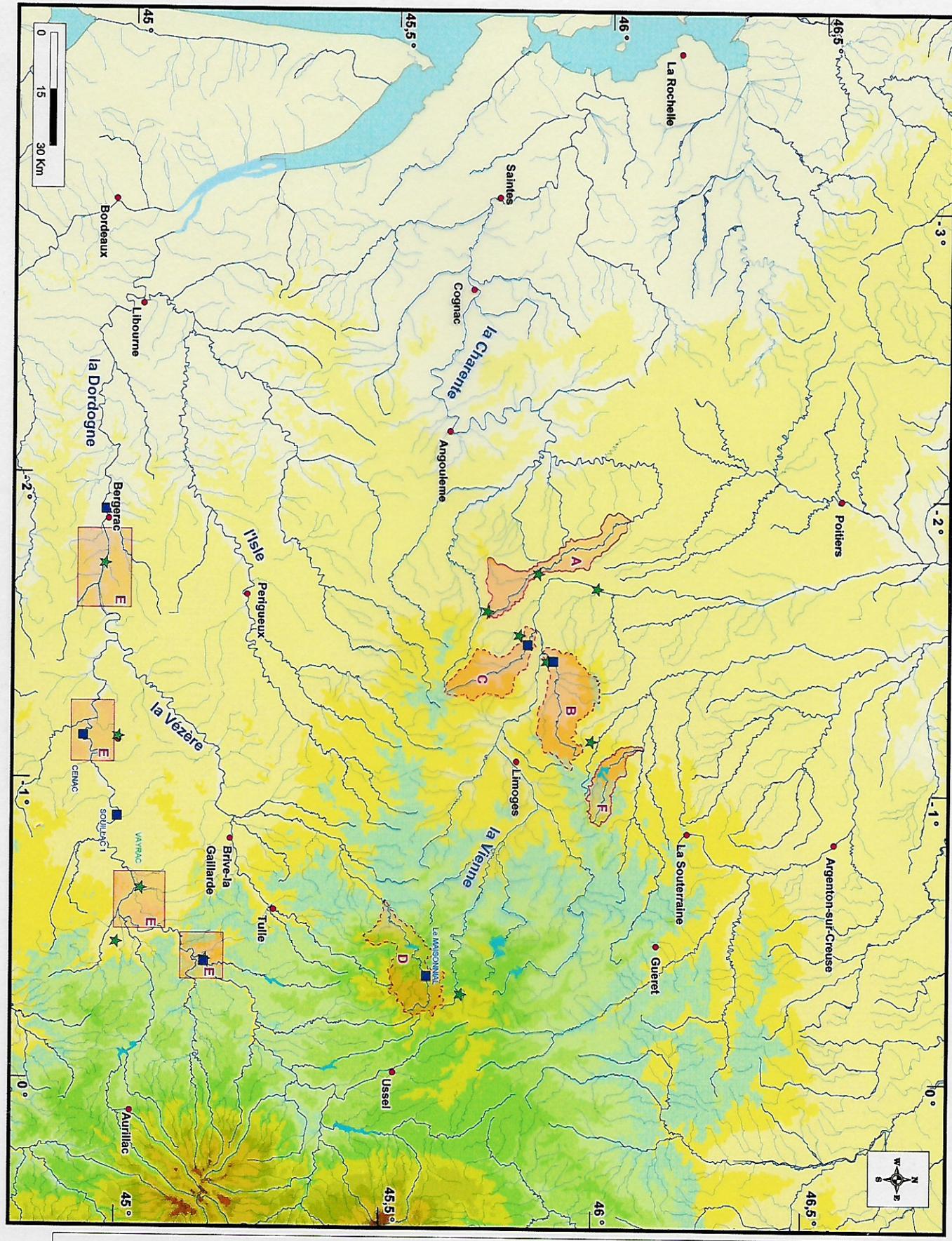
Le bassin de la Glane offre plusieurs chaînes de petits étangs aboutissant dans le Grand Etang de Cieux, permettant ainsi de cumuler les informations et la diversité. La haute Charente a l'avantage de posséder deux lacs de dimensions comparables, l'un de fonctionnement thermique libre, l'autre contraint par un déstratificateur.

L'association des différents bassins fluvio-lacustres respecte en outre les gradients régionaux. La coupe d'ouest en est permet de suivre la progression des altitudes. Le choix du bassin de la haute Charente correspond à l'étude de la partie la plus basse des plateaux, tout en bloquant la variable géomorphologique et phréatique, puisque l'Angoumois limousin et le Confolentais drainent tout autant le socle que le Limousin lui-même. Le miroir d'eau des lacs de Lavaud et de Mas Chaban se trouve respectivement à 224 et 219 m ; la température de la Charente est mesurée jusqu'à une altitude de 140 m à Alloue. A l'opposé, le choix du bassin de la haute Vézère répond à la volonté d'étudier un des terrains les plus élevés du Limousin, puisque le Puy Pendu, qui culmine à 973 m, est drainé vers l'étang des Oussines, le plan d'eau lui-même se trouvant à 836 m. Entre l'Angoumois limousin et le Plateau de Millevaches, les bassins de la Gorre et de la Glane offrent des sites thermométriques intermédiaires, sur les plateaux du Haut Limousin, complétant ainsi la coupe.

Du nord au sud, la succession des hydrosystèmes étudiés reflète une certaine différence latitudinale, le bassin de la Glane mordant sur les Monts de la Marche, tandis que la haute Dordogne ferme le Limousin au sud. Plus d'un degré de latitude sépare ces deux régions. Les thermomètres situés les plus en aval sur la Dordogne sont les seuls, en Périgord, à dépasser le socle pour appartenir au Bassin sédimentaire Aquitain.

Afin de multiplier les sites au-delà du nombre de thermomètres et de tenter d'obtenir la meilleure représentativité régionale, il a été décidé de conduire la recherche à deux niveaux. Tandis que les points stratégiques sont pourvus de thermomètres fixes, qui prennent la température en permanence depuis 1997, d'autres lieux sont munis seulement périodiquement des mêmes appareils de mesures. L'instrumentation invariable concerne l'amont et l'aval immédiat de chaque plan d'eau témoin. Les thermomètres tournants, quant à eux, équipent l'intérieur des étangs, de la manière la plus durable possible, et, de façon plus éphémère, le cours des émissaires, sur des distances plus ou moins grandes, et certains affluents. Ces sites temporaires permettent de multiplier les conclusions, par exemple sur la longueur des transects fluviaux influencés par un plan d'eau.

Fig. 1 : LES BASSINS CONCENTRANT L'INSTRUMENTATION DE TERRAIN



Bassins étudiés
sur des problématiques

- de type "lacstre"
- de type "étang"

- A la haute Charente
- B la Glane
- C la Gorre
- D la haute Vézère
- E la Dordogne
- F la Couze

- Station limnimétrique
- ★ Station météorologique



2. Matériel et méthodes

Une trentaine de sites sont équipés de thermomètres enregistreurs, protégés par un boîtier de type « IP-68 », permettant résistance aux chocs et étanchéité jusqu'à 15 m de profondeur. Les enregistreurs sont soit des *Tinytalk Data Loggers*, dont la capacité est de 1 800 mesures, soit des *Tinytag Data Loggers*, qui peuvent enregistrer jusqu'à 7 900 données. La sonde est interne pour la plupart, externe pour quelques autres. Dans le premier cas, le temps de réponse est de 1,5 minute, dans le second de 8 secondes.

La résolution des thermomètres est de 0°1. Leur précision est de 0°2 entre 0 et 75°C. Elle tombe à 0°4 entre 0 et moins 40°C, mais les températures négatives ne concernent pas les eaux douces à de faibles pressions, cas de la totalité de nos mesures. Seuls de forts courants empêchant une eau surrefroidie de geler pourraient entrer dans cette possibilité. Cela est arrivé dans quelques-unes de nos mesures, ayant relevé des températures de -0°1 ou -0°2.

La dimension du boîtier est de 78 fois 50 fois 34 mm. Les thermomètres étant très légers, puisqu'ils pèsent 120 à 160 grammes, ils doivent être fixés, afin d'éviter d'être emportés par le courant. En fonction de la taille du cours d'eau, de la granulométrie du fond du lit, des risques d'enfouissement rapide ou non du thermomètre sous les dépôts, de la fréquence de charriage de branchages pouvant se prendre dans la fixation, du besoin ou non d'être le plus invisible possible dans les parties du cours d'eau les plus exposées au vol, différents systèmes de fixation ont été conçus : boîtes grillagées lestées, boîtes en treillis plastifié avec double fond lesté, boîtes grillagées avec pieux s'enfonçant dans le sédiment meuble, fils de fer attachés aux arbres de la berge ou à des pieux, etc.

Dans les plans d'eau, les thermomètres sont fixés à une chaîne galvanisée en huit, qui, par son propre poids, assure la verticalité. Sa très grande longueur lui permet, à sa base, de fonctionner comme un corps mort, sans être difficile à remonter. La chaîne est elle-même accrochée par une manille à une bouée de balisage sphérique, de 40 cm de diamètre et 66 cm de hauteur totale, de 45 kg de flottabilité totale et 14 kg de flottabilité utile. Les thermomètres sont directement cadencés à la chaîne, par un arceau métallique et un système de fermeture à serrure, sauf ceux des tout premiers décimètres, fixés à même la bouée ou à un flotteur séparé.

Sauf cas particulier d'étude de seiche interne dans un étang, sur une courte période, les thermomètres sont programmés pour prendre une mesure toutes les heures. Dans les étangs de moins de trois mètres de profondeur, les chaînes comportent un thermomètre tous les 30 cm. Au-delà, ils sont situés tous les mètres. En tenant compte des pertes et des lacunes, le nombre total de données disponibles après quatre ans de mesures est d'environ 800 000.

La structuration des températures se fait sous un Système de Gestion de Bases de Données. Après extraction, le traitement est statistique, graphique et cartographique. Un certain nombre de diagrammes, comme les thermo-isoplèthes relatives, dont les méthodes de construction ont été exposées ailleurs (Touchart, 2001), permettent une vue synoptique des écarts de température entre les affluents et les effluents, ou entre différentes profondeurs d'un même plan d'eau, à plusieurs échelles de temps croisées.

Un nouveau procédé de détermination des sauts thermiques dans les plans d'eau est ici exposé. La gestion de plusieurs dizaines de milliers de températures se fait par le

regroupement des mesures par profil (c'est-à-dire par heure), alors que les données brutes ont été prises par thermomètre.

Il s'agit ensuite de résoudre concomitamment la recherche des points-clefs de chaque profil thermique et de multiplier automatiquement celle-ci par toutes les heures. Le premier problème concerne les températures et les profondeurs, le second le temps. Il y a ainsi, au total, trois variables. Les traiter en même temps réclame donc la constitution d'un Modèle Numérique de Terrain, effectué sous le logiciel *Surfer*.

Les profondeurs ont été assimilées à l'axe des x, les heures à l'axe des y et les températures à l'axe des z. Le « relief » ainsi obtenu est celui d'une succession de profils thermiques dans le temps. Pourtant, les trois variables constituent un cas particulier différent d'une topographie classique. En effet, ici, leur association demande à être partielle, puisqu'elle exige une interpolation des températures entre les points de profondeur, mais une indépendance entre les heures. De très nombreux essais de différentes méthodes d'interpolation ont été réalisés, conservant ou non les points initiaux mesurés comme fixes. Il a finalement été préféré les courbes les plus lissées entre les profondeurs, mais les plus indépendantes entre les heures.

L'interpolation et le lissage conduisent à l'obtention d'une donnée tous les centimètres. On demande ensuite au logiciel de calculer la dérivée en chaque point. Comme il s'agit d'un MNT, elle pourrait l'être dans n'importe quelle direction et, en morphométrie, l'intérêt vient souvent du sens de la plus grande pente. Cette sélection de l'orientation coïncide avec la notion de dérivée directionnelle de Schwartz. Ici, il convient de poursuivre la logique du profil indépendant en choisissant l'orientation correspondant précisément à la direction des profondeurs. La matrice est finalement constituée de cinq colonnes : numéro du profil (heures cumulées), profondeur, température, dérivée première, dérivée seconde.

Dans un profil thermique classique convexo-concave, la thermocline se trouve au point d'inflexion de la courbe et les deux bornes de la couche de saut thermique aux plans supérieurs et inférieurs de la courbure maximale (convexe au-dessus de la thermocline, concave en dessous). Ce sont trois limites correspondant à des valeurs-seuils des dérivées. Notons qu'un quatrième cas se distingue aussi nettement par cette méthode, celui des anomalies thermiques.

L'utilisation de la dérivée directionnelle se distingue quelque peu de celle de la dérivée fonctionnelle. Le calcul se fait seulement par rapport aux points voisins, et non sur l'ensemble de la fonction. Ce sont donc des valeurs relatives qui se suivent, sur lesquelles les seuils de 0 et 1 n'ont pas la même signification que dans le cas d'une dérivée fonctionnelle. L'emploi de la dérivée seconde s'impose alors dans certains cas, quand les valeurs de la dérivée première, puisqu'elles ne sont pas absolues, n'ont pas de signification directe.

Quoi qu'il en soit, l'important, pour notre propos, est l'utilisation pratique qu'on fait de la dérivée directionnelle. La dérivée première permet de repérer directement les inversions de température et la thermocline, tandis qu'il faut faire appel à la dérivée seconde pour déceler les bornes supérieure et inférieure de la couche de saut thermique (**figure 2**).

Normalement, la fonction est décroissante, étant donné que la température diminue quand la profondeur augmente. Cela signifie que la dérivée est partout négative. Seuls les petits segments de stratification inverse présentent une dérivée positive. En effet, la fonction est croissante sur ces intervalles, puisque la température augmente et la profondeur aussi. La

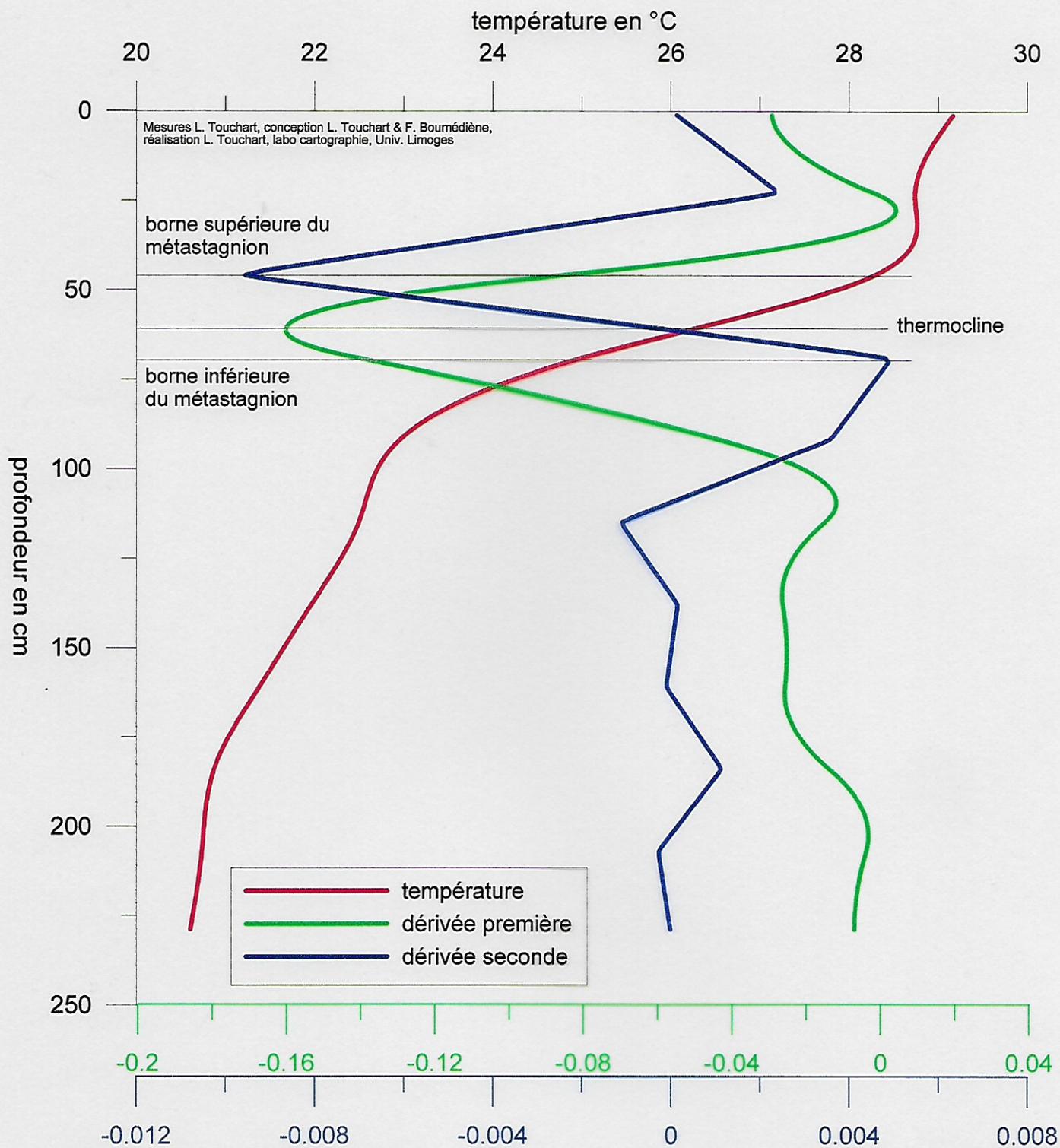


Fig. 2 La thermocline et les bornes du métastagnion de l'étang de Cieux le 24 août 1999 à 18h, définies par les valeurs des dérivées directionnelles

dérivée s'annule donc pour passer de l'un à l'autre de ces tronçons de courbe et c'est ainsi que se reconnaissent les anomalies thermiques.

La thermocline, endroit où la décroissance de la température en fonction de la profondeur est la plus forte, correspond à la dérivée connaissant en valeur absolue les plus fortes valeurs. Celles-ci se situent à l'intérieur d'un ensemble négatif. Bref, la thermocline se trouve au point de la valeur la plus basse de la dérivée première.

Quant aux plans de courbure maximale, ils correspondent aux endroits où la variation de la variation de la pente thermique est la plus forte. Ce sont les deux points de plus forte valeur absolue (l'un dans les négatifs, l'autre dans les positifs) de la dérivée seconde. Ces deux nouveaux seuils donnent les deux bornes de la couche de saut thermique (en cas de stabilité saisonnière, on la nomme métalimnion, en cas d'intermittence, on pourrait parler de métastagnion).

Cette méthode a permis d'automatiser la détection, le caractère marqué ou affaibli, les oscillations et l'évolution des différents sauts thermiques. Ce sont eux qui expliquent le fonctionnement trophique des plans d'eau, ainsi que les qualités physiques des émissaires fluviaux.

3. Résultats et conclusions

3.1. La longueur des émissaires influencée par les plans d'eau

En moyenne annuelle, la température fluviale est d'environ 2 °C plus chaude à la sortie des plans d'eau limousins à déversoir de surface qu'à l'entrée. Mais, en été, les moyennes mensuelles de réchauffement sont en général de 4 à 7 °C. Nos mesures en continu ont en outre permis de déceler des écarts inconnus dans la littérature, où les mesures sont ponctuelles. C'est ainsi que des réchauffements instantanés allant jusqu'à 14 °C ont été relevés.

Les utilisateurs des cours d'eau situés en aval d'étangs et de lacs doivent être informés de la longueur des segments fluviaux fortement influencés par les plans d'eau. Des dispositions peuvent être prises sur ces tronçons, par exemple puiser l'eau d'irrigation sur les affluents. Il ne s'agit pas non plus d'exagérer la longueur des linéaires fluviaux subissant l'effet des plans d'eau, ni de les confondre avec l'évolution normale du cours d'eau, qui se modifie de toute façon naturellement d'amont en aval dans un sens de moins en moins lentique. Pour renouer ou améliorer le dialogue, notamment entre les fédérations de pêche et les gérants des plans d'eau, il importe de connaître la longueur des segments fluviaux sensiblement sous influence.

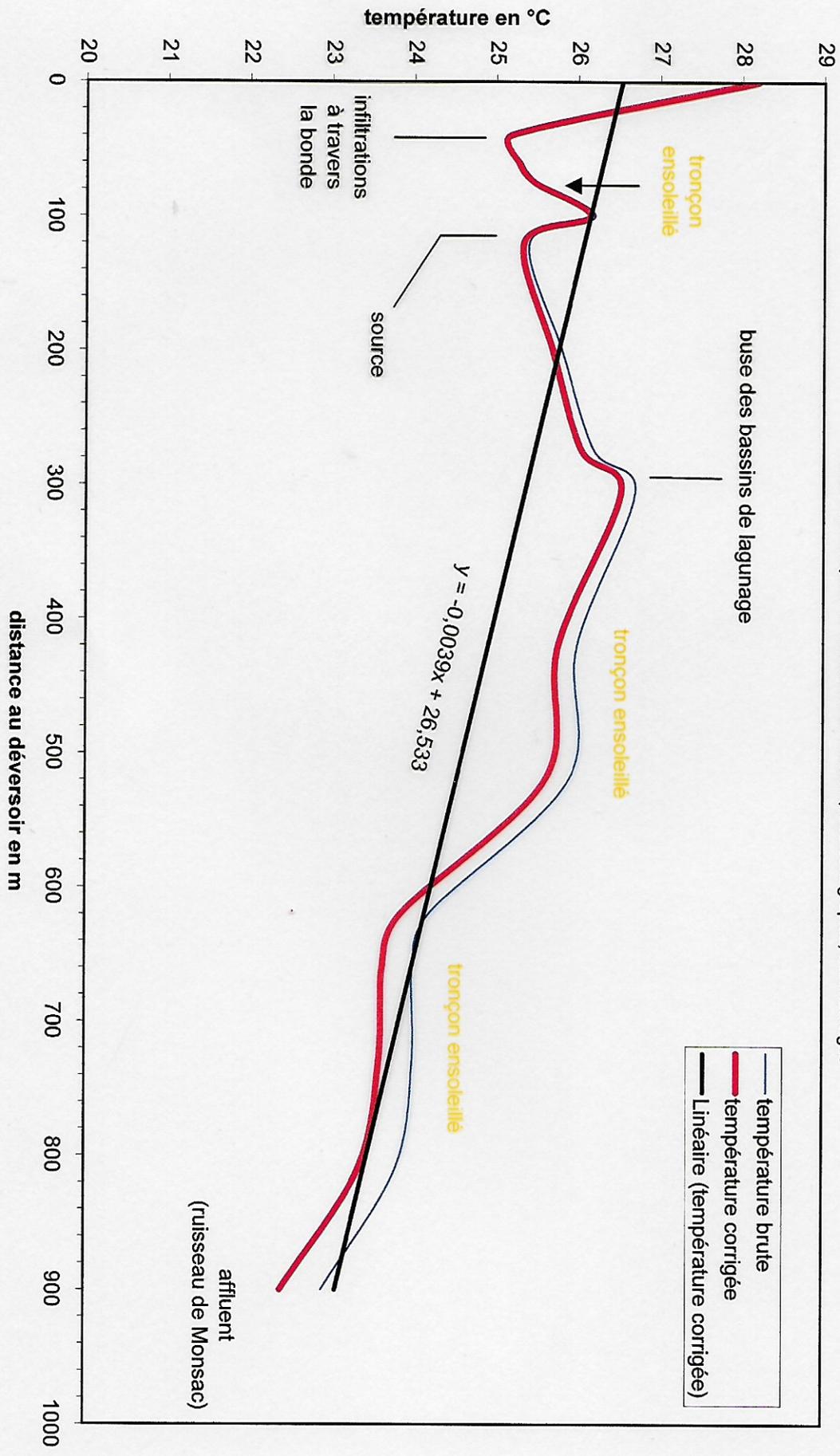
L'étude de l'étang de Cieux (30 km au NO de Limoges) a permis de dégager une fourchette supérieure de l'effet d'un plan d'eau peu profond, toutes les variables étant ici à leur niveau maximal. Ce plan d'eau est en effet l'un des plus grands de la région (40 ha), avec un bassin lui-même réchauffé par des chaînes d'étangs et l'ensemble est muni de déversoirs de surface.

Il semble que, au cœur de l'été, lors des températures les plus élevées, l'influence de l'étang de Cieux soit forte jusqu'à environ trois kilomètres du déversoir, bien que l'essentiel du réchauffement se perde déjà sur le premier kilomètre (**figure 3**). Sur ce premier segment, l'émissaire a des températures de plusieurs degrés supérieures à celles qu'il aurait en l'absence de plan d'eau. L'influence est ensuite faible, mais décelable ; elle se compte en dixièmes de degré jusqu'à une dizaine de kilomètres de l'étang et concerne surtout les

Fig. 3 Courbes des températures synchrones de l'émissaire de l'étang de Cieux

le 10 août 1998 entre 16h et 16h45

Mesures, conception et réalisation L. Touchart, labo cartographie, Univ. Limoges



maxima. En fin d'été, le réchauffement de l'émissaire réduit son linéaire d'influence, mais reste encore observable pendant la première moitié de l'automne.

Le linéaire en aval des étangs à moine n'a pas été étudié précisément, puisque l'utilisation des émissaires concernés ne donne lieu, en général, à aucune polémique. A 200 m de la sortie, sur un cours d'eau de rang 4, les qualités d'une eau puisée à 3 ou 4 m de profondeur sont encore prononcées. Les mesures sur de plus grandes distances ont été préférées dans le cas des lacs, où le soutirage se fait à des profondeurs plus importantes.

La particularité des émissaires lacustres est, par rapport aux étangs, la possibilité d'une alimentation par une eau de grande profondeur, assurément hypolimnique. Si l'eau sort avec une parfaite stabilité thermique en été, les rythmes, et notamment le cycle diurne, réapparaissent rapidement, en quelques kilomètres (Martinez, 1998). Une influence thermique sensible peut exister sur quelques dizaines de kilomètres, qui, se faisant dans le sens d'un rafraîchissement estival et d'une réduction des écarts, est souvent bien perçue par les utilisateurs. L'accentuation de ces effets sur une longue distance, par exemple réclamée sur la Dordogne par les fédérations de pêche, nécessiterait des augmentations de débits considérables, qu'il est impossible de réaliser (**figure 4**).

Le bilan climatique et les apports des affluents successifs noient finalement assez vite l'influence thermique des plans d'eau sur leurs émissaires, du moins si une chaîne ne les reconstitue pas en relais. Puisque, au total, la propagation n'est pas si longue, c'est donc seulement dans la partie la plus amont que l'influence est forte, d'où une réflexion sur l'aménagement des déversoirs, des moines et des vannes pour les cours d'eau juste à la sortie des plans d'eau.

3.2. La température et l'aménagement des étangs

En liaison avec les administrations du Limousin, en premier lieu la Diren, qui encouragent largement les possesseurs d'étangs à munir leur plan d'eau d'un moine, et avec les syndicats de propriétaires d'étangs, qui ont aussi besoin d'informer leurs adhérents en connaissance de cause, les mesures réalisées prouvent qu'une sortie de surface ou un soutirage de profondeur ont des effets thermiques très différents.

Bien que, dans certains cas, notamment du fait de la fréquence des oscillations des thermoclines, l'opposition entre déversoir et moine soit susceptible de s'amenuiser un peu, le fait même de choisir un déversoir superficiel ou un moine ne peut plus être considéré comme égal ou de conséquence négligeable.

En effet, le principal enseignement de cette recherche réside dans la détermination du caractère durable et souvent très prononcé de la stratification thermique dans les étangs, avec à la fois des sauts thermiques profonds assez stables et des thermoclines superficielles, parfois plus éphémères mais souvent très marquées (**figure 5**). Or les étangs à moine réchauffent le cours d'eau avant tout en fonction des brassages, tandis que les étangs à déversoir de surface le réchauffent surtout en fonction de l'insolation.

Il a été vérifié et quantifié que l'eau de fond des étangs est, comme attendu, plus froide que l'eau de surface, sauf au cœur de l'hiver. Mais, du fait de l'emmagasinement de la chaleur par radiation directe et convection mécanique, l'eau de fond des étangs de taille moyenne est plus

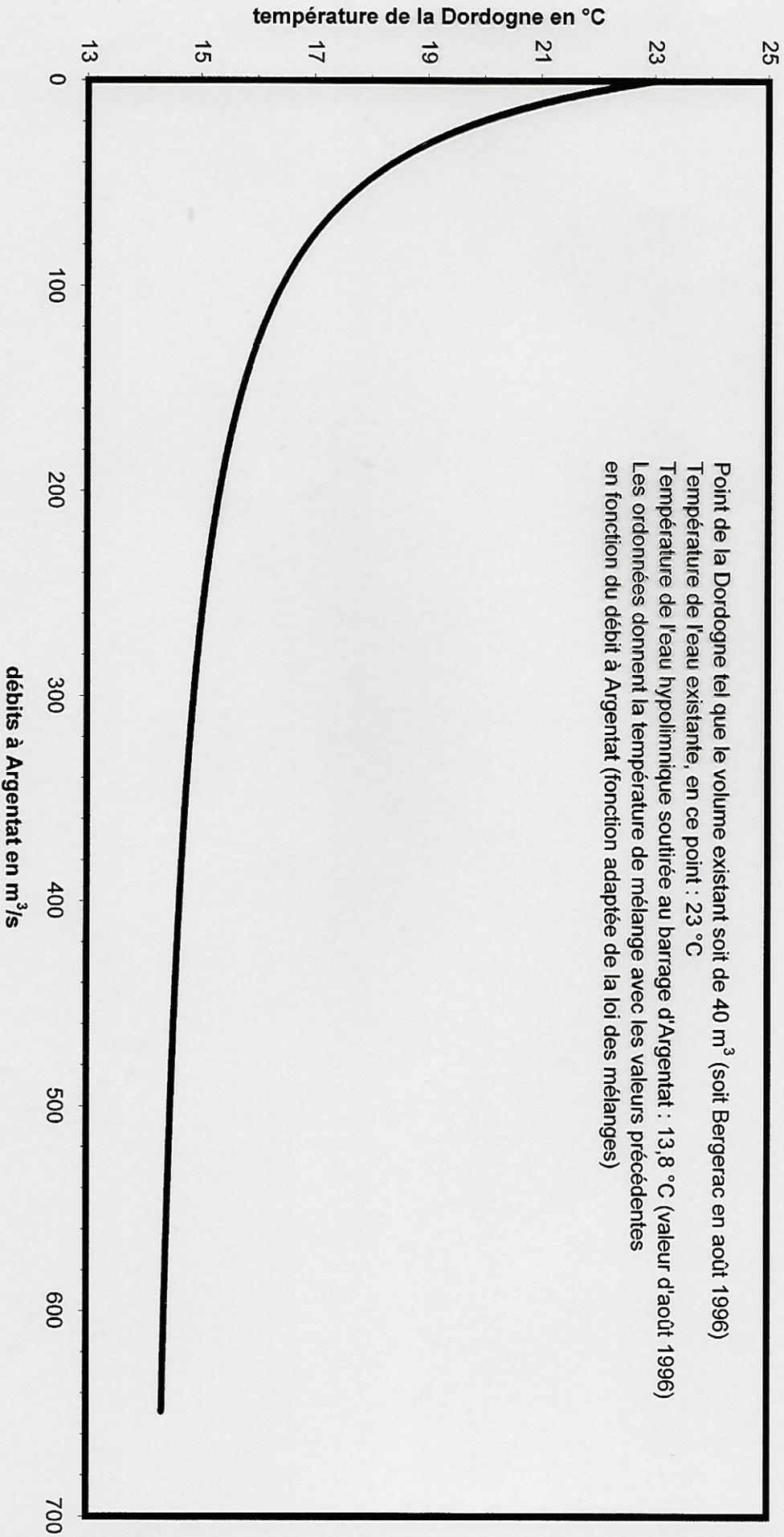


Fig. 4 Simulation de la température estivale de la Dordogne en fonction des débits lâchés par le barrage d'Argentat

Données Epidor et SHC, étude de fonction P. Martinez, 1998, traitement et réalisation L. Touchart

chaude que l'eau des rivières tributaires. Ce dernier point, qui n'avait pas été souligné jusqu'à présent, remet en cause l'effet rafraîchissant attendu du moine.

Bien que l'eau fluviale soit, au contraire de ce qu'on entend souvent dire, en général réchauffée par les étangs à moine, cela ne signifie pas pour autant que ce type d'équipement soit inutile. Il ne faut cependant pas en surestimer les capacités, ni vouloir lui faire produire ce qu'il ne peut pas, c'est-à-dire une eau constamment froide en été. Il convient aussi d'être conscient d'un certain nombre d'effets secondaires allant plutôt à l'inverse de ceux habituellement escomptés, comme le fait que les minima thermiques seront assez largement réchauffés, de même que les fins d'été et les débuts d'automne.

Une fois ces précautions assimilées, un moine peut être préconisé si l'on veut réduire les valeurs totales de réchauffement, voire lors des périodes estivales caniculaires et peu ventées, aboutir à un léger rafraîchissement du cours d'eau. Cet aspect, qui peut être considéré comme bénéfique, a cependant pour cause une stratification thermique stable et prononcée, donc pour corollaire une certaine désoxygénation.

Les moines doivent surtout être conseillés, si l'on souhaite préserver les cours d'eau des forts réchauffements printaniers et de début d'été, abaisser les maxima thermiques nuisibles aux organismes vivants et diminuer les sautes brutales de température. De fait, c'est dans l'énorme réduction des écarts thermiques à courte échelle de temps que le moine semble provoquer l'effet le plus recherché. Pérenne, son effet stabilisateur est même le plus prononcé pendant les mois les plus chauds, justement quand les organismes en ont le plus besoin.

L'installation d'un moine constituant un certain investissement, il convient de s'interroger sur la pertinence ou non de munir les étangs d'un tel équipement. Or nos mesures ont permis de déterminer pour la première fois quelques seuils de profondeur susceptibles de nourrir la réflexion et la prise de décision à ce sujet, du moins dans les conditions climatiques de l'ouest de la France.

Pour les étangs pelliculaires, de moins d'1 m de profondeur, le système d'évacuation des eaux importe peu, toute sortie alimentant quoi qu'il en soit l'émissaire en eau d'épilimnion supérieur, homogénéisée chaque nuit.

Entre 1 et 3 à 4 m de profondeur, le moine fournit généralement une eau sans saute thermique, mais, pendant une dizaine de jours cumulés sur l'été, le réchauffement du cours d'eau pourra être très important, supérieur à 5 à 6 °C. Un moine seul peut être conseillé, l'oxygénation complète du plan d'eau se produisant environ une fois par décade pendant la saison chaude.

Entre 3-4 m et 5-6 m, un moine situé au fond de l'étang soutire une eau différente de celle d'un déversoir de surface pratiquement pendant la totalité de la saison chaude. L'eau de sortie est relativement peu réchauffée par rapport à celle d'entrée et les écarts thermiques sont écrasés. L'eau a en revanche tendance à se désoxygéner. Quelques heures, réparties sur trois ou quatre jours, peuvent faire exception sur tout un été. Si un moine doit être posé, il est préférable de l'accompagner d'équipements annexes destinés à améliorer la qualité de l'eau, notamment une cascade de réoxygénation.

Au-delà de 6 m, les plans d'eau possèdent une couche profonde isolée saisonnièrement de la surface. L'existence d'un moine aura pour conséquence de puiser une eau hypolimnique, de température fraîche et stable pendant toute la saison chaude, mais qui aura séjourné au contact

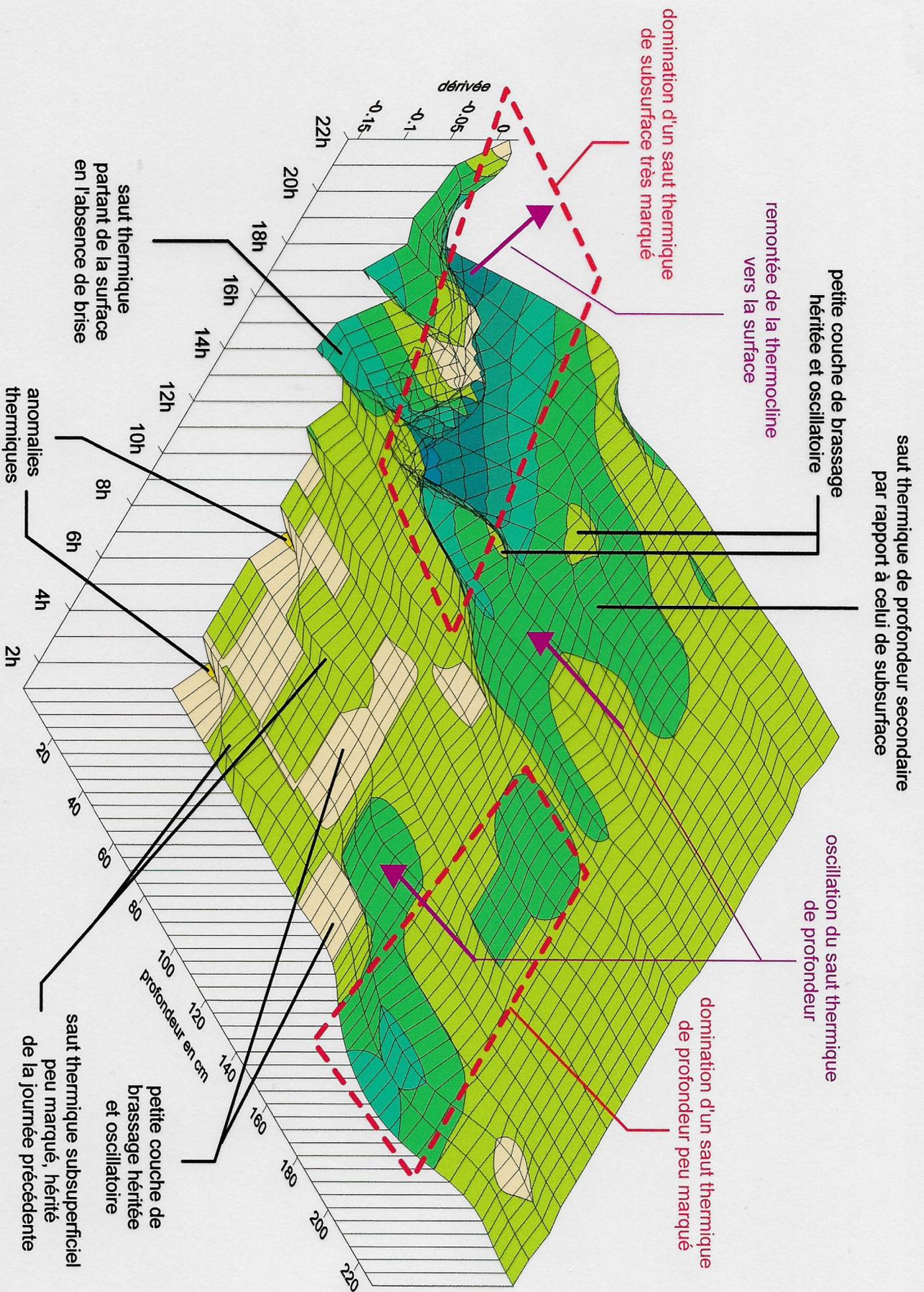


Fig.5 Représentation de l'évolution dans le temps et l'espace vertical de la dérivée directionnelle de la température fonction de la profondeur dans l'étang de Cieux le 24 août 1999

Mesures et réalisation Touchart, conception L. Touchart et F. Bourmédière, Labo cartographie, Univ. Limoges

de sédiments anoxiques et réduits. Le fonctionnement par moine se rapproche alors de celui d'une vanne de fond d'un lac de barrage.

Les seuils précédents concernent des plans d'eau de quelques hectares. Sur les étangs très étendus, la course du vent affaiblit la stabilité, si bien que la réflexion concernant la validité de l'installation de moines doit s'appuyer sur des valeurs de profondeur plus grandes. Dans des étangs d'une trentaine ou d'une quarantaine d'hectares, il suffit de flux d'air de neuf à dix kilomètres par heure pour détruire la stratification thermique des premiers mètres. Les sautes de température sont ainsi plus fréquentes dans l'émissaire, même quand un moine a été installé, d'autant que des anomalies de zonation thermique horizontale ne sont pas à exclure.

Ces plans d'eau intermédiaires conduisent aux lacs à proprement parler.

3.3. La température et l'aménagement des lacs de barrage

Dans le cas de plans d'eau de plusieurs centaines d'hectares, le seuil de micticité saisonnière semble, d'après le traitement de profils thermiques du Conseil Général de la Charente dans le lac de Lavaud (Savy, 2000), se trouver à au moins 8 m de profondeur dans les conditions climatiques de l'Angoumois et du Limousin. Si cette limite est dépassée, la stratification thermique a tendance à être permanente pendant la totalité de l'été. Dans un contexte de gestion des lacs de barrage, la question se pose alors de savoir s'il est pertinent de lutter contre l'étagement des masses d'eau.

C'est le choix qui a été fait dans le lac voisin de Mas Chaban, par l'installation, en l'an 2000, d'un déstratificateur. Appartenant à la famille des injecteurs d'air, son principe de fonctionnement réside dans l'introduction de bulles en profondeur. Celles-ci remontent pour venir éclater à la surface, formant un panache, et, ce faisant, entraînant de l'eau dans leur sillage. C'est sur ce principe d'accompagnement de l'air par l'eau lors du mouvement ascendant qu'est fondée l'efficacité du procédé.

D'un point de vue strictement thermique, il ressort de l'étude des profils thermiques que, si l'on empêche la stratification de s'installer, le degré de chaleur de l'émissaire est augmenté, par rapport à un soutirage hypolimnique classique. Le jeu de vannes à différents niveaux dans un lac stratifié donne une plus grande souplesse à la gestion de la température de l'eau de sortie du barrage que la pose d'un déstratificateur. En revanche, dans le second choix, l'oxygénation du lac se fait sur toute la tranche, jusqu'aux sédiments. L'installation d'un aérateur à séparation des gaz ne détruisant pas la barrière thermique cumulerait les deux avantages et permettrait l'utilisation efficace des différents niveaux de vannes, tandis que la déstratification rend leur action égale, donc non modulable.

Remerciements

Cette étude est financée par le Conseil Régional du Limousin, l'EA 1086 TSP de l'Université de Limoges (dir. M. Cassan) et l'UMR 6042 du CNRS de Clermont-Ferrand (dir. M.-F. André).

Bibliographie

Collings M.R., 1969, « Temperature analysis of a stream » *US Geological Survey professional Paper*, 650-B : 174-179.

- Combrouze P., 2000, « Lacs et étangs » in Fortin F. & Boeufgras J., Coord., *Le Limousin côté nature*. Saint-Gence, Espaces Naturels du Limousin, 216 p. : 34-36.
- Eckel O., 1951, « Über die interdiurne Veränderlichkeit der Fluss – und Seeoberflächen – Temperaturen » *Wetter und Leben*, 3 : 203-212.
- El-Jabi N., El-Kourdahi G. & Caissie D., 1995, « Modélisation stochastique de la température de l'eau en rivière » *Revue des Sciences de l'Eau*, 8(1) : 77-95.
- Kobayashi D., Kodama Y., Ishii Y., Tanaka Y. & Suzuki K., 1995, « Diurnal variations in streamflow and water quality during the summer dry season » *Hydrological Processes*, 9(7) : 833-841.
- Mackichan K.A., 1967, « Diurnal Temperature Variations of three Nebraska Streams » *US Geological Survey Professional Paper*, 575-B : 233-234.
- Martinez P., 1998, *Les températures de l'eau de la Dordogne, tronçon entre Argentat et Tuilières, 10 juillet 1996 – 31 juillet 1997*. Univ. Limoges, mémoire de maîtrise de géographie, 201 p. + 51 p. d'annexes.
- Savy B., 2000, *Les lacs de Mas Chaban et de Lavaud, et la température des eaux du fleuve Charente durant le soutien d'étiage 2000*. Univ. Limoges, mémoire de DEA de géographie, 119 p.
- Steele T.D., 1982, « A characterization of stream temperatures in Pakistan using harmonic analysis » *Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques*, 27(4) : 451-467.
- Touchart L., 2001, « Der tägliche und jahreszeitliche Einfluss kleiner Wasserflächen auf die Temperatur von Wasserläufen am Beispiel des Sees Theil im Limousin » *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 45(5) : sous presse.
- Vannote R.L., 1980, « Thermal heterogeneity of river systems » *The American Naturalist*, 115 : 667-695.
- Ward J.C., 1963, « Annual variation of stream water temperature » *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89(SA6) : 3710-3732.
- Ward J.V., 1974, « A temperature-stressed stream ecosystem below a hypolimnial release mountain reservoir » *Archiv für Hydrobiologie*, 74(2), 247-275.
- Ward J.V., 1985, « Thermal characteristics of running waters » *Hydrobiologia*, 125 : 31-46.
- Webb B.W. & Walling D.E., 1985, « Temporal variation of river water temperatures in a Devon river system » *Hydrological Sciences Journal*, 30 : 449-464.
- Webb B.W. & Walling D.E., 1988, « Modification of temperature behaviour through regulation of a british river system » *Regulated Rivers : Research and Management*, 2 : 103-116.
- Webb B.W., Walling D.E., Zhang Y., Clark E., 1996, « Water temperature behaviour in South-West England » in Mérot P. & Jigorel A., Ed, *Hydrologie dans les pays celtiques*. Actes du 1^{er} colloque interceltique d'Hydrologie et de gestion des eaux, Rennes, 8-11 juillet 1996, Paris, INRA, col. « Les colloques » n°79, 470 p. : 53-64.
- 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.