



HAL
open science

L'effet d'un étang à moine et à dérivation sur la température d'un cours d'eau limousin : le cas du “ lac ” d'Uzurat (Limoges) sur l'Aurence

Laurent Touchart, Cailliez Simon, Quentin Choffel, Pascal Bartout, Francesco Donati, Boussion Céline

► To cite this version:

Laurent Touchart, Cailliez Simon, Quentin Choffel, Pascal Bartout, Francesco Donati, et al.. L'effet d'un étang à moine et à dérivation sur la température d'un cours d'eau limousin : le cas du “ lac ” d'Uzurat (Limoges) sur l'Aurence. *Dynamiques Environnementales - Journal international des géosciences et de l'environnement*, 2020, étangs et lacs, études croisées de chercheurs et de professionnels, 45, pp.181-208. hal-03418513

HAL Id: hal-03418513

<https://univ-orleans.hal.science/hal-03418513>

Submitted on 20 Jun 2022

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., Cailliez S., Choffel Q., Bartout P., Donati F., Boussion C, 2020,
« L'effet d'un étang à moine et à dérivation sur la température d'un cours
d'eau limousin : le cas du « lac » d'Uzurat (Limoges) sur l'Aurence »
*Dynamiques Environnementales - journal international des géosciences et
de l'environnement*, 45 : 181-208.

Pour HAL : mise en page différente de celle de l'éditeur.

L'effet d'un étang à moine et à dérivation sur la température d'un cours d'eau limousin : le cas du « lac » d'Uzurat (Limoges) sur l'Aurence

Laurent TOUCHART, Simon CAILLIEZ, Quentin CHOFFEL, Pascal BARTOUT, Francesco DONATI, Céline BOUSSION, laboratoire CEDETE Université d'Orléans

Résumé : Le « lac » d'Uzurat est un étang à moine de la ville de Limoges qui barre l'Aurence depuis 1979. Cette rivière, dont le module brut est d'environ $0,55 \text{ m}^3/\text{s}$ au niveau de l'étang, connaît un régime pluvio-évaporal océanique aux basses eaux de saison chaude. L'Aurence a été hérissée de nombreux moulins pendant des siècles et faisait figure de rivière construite et productive. Dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle, son lit mineur a au contraire été préservé de la canalisation intégrale et de l'urbanisation des nouvelles ZUP, ZAC et ZI l'entourant désormais, par une politique volontariste d'aménagement du territoire. La vallée de l'Aurence est ainsi devenue la principale coulée verte de Limoges. Dans le cadre administratif européen et français de la restauration de la continuité écologique des cours d'eau, un chenal de dérivation contournant l'étang a été construit de 2017 à 2019. Un suivi de la température de l'eau a été mené pendant l'été caniculaire 2019, au moyen à la fois de thermomètres enregistreurs automatiques et de mesures ponctuelles par un thermomètre à platine de haute précision. De la mi-juillet à la fin août (mesures en continu), l'ensemble de l'étang pourvu de son moine et de sa dérivation a réchauffé l'eau de la rivière de $0,5 \text{ °C}$ en moyenne, augmentant surtout les maxima diurnes. A l'intérieur du seul chenal de dérivation (mesures ponctuelles lors des maxima diurnes), l'eau se réchauffe d'amont en aval selon un gradient de $0,26 \text{ °C} / 100 \text{ m}$. Si l'étang d'Uzurat provoque un réchauffement assez faible de la rivière (en comparaison d'étangs à déversoir ou moine étudiés par ailleurs), c'est que ses deux équipements ont un effet complémentaire. Le moine contrecarre le réchauffement dû à la dérivation ensoleillée l'après-midi, quand l'étang est stratifié, tandis que la dérivation contrecarre le réchauffement dû au moine la nuit et le matin, quand l'étang est brassé. Selon les deux méthodes classiques de détermination de la température fluviale de référence, l'émissaire rétablit sa température initiale à environ 800 m en aval de l'étang. Mais, pour tenir compte d'une succession de secteurs ombrés et ensoleillés recoupés par l'émissaire et pour tenir compte du fait que la dérivation est au soleil et que l'Aurence avant la mise en eau de l'étang traversait un terrain largement ensoleillé, cet article propose une nouvelle méthode de détermination de la température de référence fluviale. Celle-ci intègre le fait que l'Aurence aurait vu sa température augmenter d'amont en aval même en absence d'étang. En dehors du calcul mathématique, cela pose la question d'un éventuel point de référence naturel dans une rivière aménagée depuis des siècles et dont le bassin versant a été largement urbanisé au cours des dernières décennies.

Mots-clefs : étang urbain, étang à dérivation, chenal de dérivation, moine d'étang, température de l'eau, température fluviale, ombre.

English title: **The impact of a pond equipped with bypass channel and monk on stream temperature by the example of the Uzurat "lake" (city of Limoges, France) on Aurence River.**

Abstract: The Uzurat "lake" (in advertising or promotional material) is a monk pond located in the city of Limoges which has dammed the Aurence River since 1979. This river, whose mean discharge from pond outlet is about $0.55 \text{ m}^3 / \text{s}$, has low water in summer. The Aurence River looked like a built and productive river with many mills for centuries. In the second half of the twentieth century, the small valley was preserved from canalization by a proactive policy of regional planning but not from urbanization of its watershed. The Aurence valley has thus become the main green belt in Limoges. Within the European and French administrative framework restoring the ecological continuity, a diversion channel bypassing the pond was built from 2017 to 2019. Water temperature monitoring was conducted during the hot summer of 2019, using both recording thermometers and point measurements with a high-accuracy platinum thermometer. According to continuous measurements from mid-July to the end of August, the pond hydraulic system with monk and bypass warmed the river mean temperature by 0.5 °C , especially increasing diurnal maxima. Within the diversion channel (measurements only during diurnal maxima), the water heats up from upstream to downstream following a gradient of $0.26 \text{ °C} / 100 \text{ m}$. The Uzurat pond causes the river to warm relatively little (compared to spillway or monk ponds) because its two hydraulic equipments have a complementary impact. The monk counteracts the warming due to the sunny diversion in the afternoon, when the pond is stratified, while the diversion channel counteracts the warming due to the monk at night and in the morning, when the pond is mixed. According to the two classical methods of determining the reference temperature, the river returns to its initial temperature about 800 m downstream from the pond. But, since the outfall crosses a succession of shaded and sunny sectors and since the bypass channel runs in open environment, this paper proposes a new method for determining the river reference temperature. Our historical cartographic reconstruction of the ancient stem of the river takes into account that the Aurence River water temperature would have risen from upstream to downstream even without

pond. Apart from the mathematical calculation, this is discussed about a possible natural reference point in a river that has been built and equipped for centuries and whose watershed has been largely urbanized in recent decades.

Key words: urban pond, bypassed pond, diversion channel, pond monk, water temperature, stream temperature, shade.

Introduction

Dans un contexte européen, et plus encore français, de restauration de la continuité écologique des cours d'eau et d'effacement des obstacles à l'écoulement, les propriétaires d'étangs se retrouvent de plus en plus souvent devant l'alternative suivante : supprimer le plan d'eau à l'aide d'une subvention ou bien réduire son effet sur le cours d'eau en construisant un chenal de dérivation à leurs frais. Selon l'administration, ce dernier équipement rétablit la continuité sédimentaire et piscicole. Concernant la qualité de l'eau, dont la température est un élément essentiel, en déterminant beaucoup d'autres (Williams, 1968), les études de l'effet d'une dérivation sont rares. On sait cependant que la dérivation diminue bien plus le réchauffement de l'eau dû aux étangs que le moine seul (Touchart, 2007, Touchart et Bartout, 2011). Les recherches de C. Millot (2015) ont ajouté que la dérivation était la plus efficace quand elle contournait un étang lui-même équipé d'un moine, et non d'un déversoir de surface. Pour autant, les recherches précédentes toutes réalisées en milieu rural, concernaient soit de petites dérivations de contournement d'étangs privés, soit des étangs plus grands sur dérivation.

Le présent article se propose d'étudier un grand étang public, géré par une collectivité urbaine, dont la dérivation de contournement est très importante à deux égards. D'une part, elle-même et le répartiteur qui lui donne naissance sont objectivement de grande taille, le traitement paysager de l'ensemble est particulièrement soigné et le coût de l'opération est en conséquence élevé. D'autre part, le caractère emblématique, exemplaire, de l'aménagement de la dérivation contournant l'étang d'Uzurat transparaît subjectivement à la lecture des bulletins de la communauté urbaine de Limoges. Le principal étang de loisirs urbain de la plus grande ville et agglomération du centre-ouest de la France a vocation à être un modèle, une réussite de l'application des préconisations de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne. Et la pratique de terrain confirme cette impression. Le tronçon « à macrorugosités » (Reix et Bidault, 2017, p. 70), dit aussi « ouvrage éco-hydraulique piscicole » dans la Déclaration d'Intérêt Général de 2016, à l'imitation d'un torrent andin, hérissé de fiers blocs impétueux, le tunnel qui conduit celui-ci à la pêcherie de l'étang, les passerelles qui font franchir au promeneur le chenal et mènent celui-là, sinon à s'ébahir et s'émerveiller, du moins à ne jamais oublier celui-ci, tout concourt à impressionner le visiteur.

Comme, à un peu plus de 2 km en aval, la rivière Aurence est barrée d'un autre étang, qui, lui, n'est pas encore contourné par une dérivation, la restauration de la continuité est pour l'instant limitée à un court tronçon. Son effet sera donc d'autant plus pertinent à évaluer que le paramètre choisi aura une réaction rapide dans le temps et appréciable sur un linéaire fluvial de faible longueur. De ce point de vue, plus encore que le transit sédimentaire et l'éventuel passage des poissons, le suivi de la température de l'eau est justifié. C'est un indicateur majeur de la qualité de l'eau, dont le temps de réponse à un nouvel aménagement hydraulique est immédiat et qui s'appréhende à plusieurs échelles géographiques. Quelle est l'influence cumulée de la dérivation et du moine de l'étang sur la rivière ? Si l'on isole l'effet seul de la dérivation, comment la température évolue-t-elle tout le long du chenal ? Selon quelles modalités l'émissaire tend-il à rétablir ses caractéristiques fluviales d'amont en aval ? A-t-il achevé de reprendre ses qualités initiales quand il entre dans le second étang, qui, lui, n'a pas de moine, mais seulement un déversoir de surface ?

Pour discuter ces questions avant de tenter d'y apporter quelques éléments de réponses, plusieurs hypothèses de travail peuvent être formulées à différentes échelles :

(1) A l'échelle de l'ensemble de l'étang pourvu d'un double équipement, le moine soutirant l'eau profonde et la dérivation le contournant, on peut poser que cet aménagement complet minimise largement l'effet du plan d'eau sur le cours d'eau. Cette échelle géographique, dont l'étude consiste à comparer l'eau de la rivière en amont du répartiteur et juste en aval du confluent entre la sortie du moine et le chenal de dérivation, est la plus importante en termes de recherche appliquée et de résultats descriptifs. C'est elle qui mesure l'efficacité de l'aménagement dans son entièreté.

(2) A l'échelle de la dérivation, l'étude permettra d'aborder les causes du phénomène et d'isoler le fonctionnement du chenal artificiel, qui est l'élément nouveau de l'aménagement hydraulique, construit pour restaurer la continuité fluviale. Trois hypothèses secondaires peuvent être formulées. (2.1.) Le petit bassin créé devant le répartiteur surchauffe les eaux et aura les plus fortes températures de tous les points de mesures. (2.2.) La dérivation étant au soleil, elle s'échauffera d'amont en aval. (2.3.) La dérivation sera plus chaude que la rivière naturelle d'amont, mais plus fraîche que la sortie de l'étang.

(3) A l'échelle de l'émissaire, on s'attend à un refroidissement régulier d'amont en aval, qui devrait conduire la rivière à tendre vers sa température initiale.

Mais, au-delà de la résolution de ces questions pratiques, cet article a pour objectif fondamental de discuter, sinon remettre en cause, le caractère unique du point de référence habituel de la qualité fluviale, à partir duquel est mesuré l'effet d'un étang, qui est situé en amont du plan d'eau. En effet, cette localisation ne tient pas compte de la manière dont la température du cours d'eau aurait évolué en l'absence d'étang à la traversée du terrain aujourd'hui en eau. Or la reconstitution d'un chenal, fût-il artificiel et de contournement, peut permettre d'approcher ce gradient fluvial qui aurait existé sans étang.

1. Un étang urbain récent prolongeant une vieille rivière aménagée

1.1. Un étang limousin de milieu océanique subissant un été 2019 exceptionnel

Le climat de la région peut être qualifié grâce aux données de la station Météo-France de Limoges-Bellegarde (identifiant 87085006). Elle est située à 7,3 km à l'ouest de l'étang d'Uzurat, à une altitude de 402 m, soit 105 m plus haut que le plan d'eau. Selon les critères de définition classique des géographes P. Estienne et A. Godard (1970), le climat de l'ouest du Limousin est « hyperocéanique », ou « océanique vrai », mais il est à la limite du climat « océanique de transition ». Son rythme de précipitations est ainsi typiquement hyperocéanique, les quatre mois les moins humides de l'année étant aussi les plus chauds, de juin à septembre. Pour la normale trentennale allant de 1981 à 2010, le total annuel est de 1023,5 mm, dont seulement 292,2 mm pendant les quatre mois chauds, le minimum mensuel étant de 65,6 mm en juillet. Sa faible amplitude thermique annuelle se place tout de même dans la fourchette la plus haute de l'océanité vraie, puisque, égale à 15,1 °C pour la normale 1981-2010, elle dépasse d'un dixième de degré la limite définie par P. Estienne et A. Godard (1970). Le rythme thermique océanique décale le maximum de chaleur sur la fin de l'été, sans arriver malgré tout à faire qu'août (19,1 °C) dépasse juillet (19,3 °C), et le froid sur la fin de l'hiver, février (5,0 °C) étant moins froid que décembre (4,9 °C) de seulement un dixième de degré. A l'échelle journalière, la faible amplitude diurne apériodique, au sens de Ch. Péguy (1970), dont la moyenne annuelle est de 7,6 °C, confirme l'appartenance au climat océanique. Enfin, d'un jour à l'autre, « la rapidité des changements de temps, si frappante dans la plus grande partie du Massif [Central], atteint [en Limousin] ses valeurs les plus remarquables » (Estienne, 1956, p. 127).

Dans ce contexte climatique, l'été 2019 s'est singularisé par sa chaleur et sa sécheresse, toutes deux très au-dessus de la normale. La moyenne quadrimestrielle des températures de juin à septembre 2019 a été de 19,8 °C, soit 2,0 °C au-dessus de la normale. Et celle de juillet 2019 a été de 21,8 °C, soit 2,5 °C au-dessus de la normale. La moyenne quadrimestrielle des maxima diurnes de juin à septembre 2019 a été de 24,9 °C, soit 2,5 °C au-dessus de la normale. Et celle de juillet 2019, égale à 26,9 °C, a dépassé la normale de 3,0 °C. Il est à noter que le 23 juillet 2019, une température instantanée de 37,9 °C a été mesurée, la plus haute jamais mesurée à Limoges-Bellegarde depuis l'ouverture de la station en 1973. L'ensoleillement a lui aussi été supérieur à la normale pendant les quatre mois, culminant en juillet à 311,6 heures, soit 31 % de plus que la trentennale. Seule l'aggravation de la sécheresse n'a pas concerné les quatre mois, puisque juin 2019 avait été au contraire très arrosé, les 128,8 mm de précipitations étant deux tiers au-dessus de la normale. Mais juillet (33,3 mm, soit moitié moins), août (18,7 mm, soit trois quarts moins) et septembre (54,1 mm soit un quart moins) avaient subi une sécheresse accentuée.

L'Aurence est un petit affluent de rive droite de la Vienne, d'une trentaine de kilomètres de longueur, qui contourne la ville de Limoges par le nord et l'ouest. Son bassin d'alimentation s'étend sur 94,2 km² et, muni du code FRGR0380, il est nommé « l'Aurence et ses affluents depuis sa source

jusqu'à sa confluence avec la Vienne » dans le jargon administratif des « masses d'eau » issues de la Directive cadre européenne sur l'eau (**fig. 1**). L'unique station hydrométrique actuellement en service, installée en 1995 sous le code L0614020, est située à 230 m d'altitude, très en aval, à Isle, drainant un bassin de 87 km². Après 25 ans de mesures, le module brut est de 1230 litres par seconde. Quant au module spécifique, sa valeur de 14,1 l/s/km² le place exactement dans la moyenne de l'ensemble du Limousin, qui est de 15 l/s/km² selon Ph. Bernard-Allée (1994). Le régime de l'Aurence est pluvio-évaporal océanique, les hautes eaux courant de décembre à mai, les basses eaux de juin à novembre. Les débits moyens mensuels les plus haut et bas sont de 2110 l/s en janvier et 414 l/s en septembre, si bien que le coefficient de pondération qui en fait le rapport est de 5,10. La rivière a donc un régime modéré au sens d'A. Guilcher (1979). Elle est en revanche irrégulière d'une année à l'autre, les maxima mensuels étant loin d'être toujours en janvier. Le plus haut pic de crue jamais enregistré a été celui du 3 février 2003, quand le débit est monté à 28 400 l/s, soit 326 l/s/km². Le débit moyen annuel brut de 2019, égal à 1310 l/s, a été supérieur à la normale, essentiellement du fait que novembre et décembre ont été très élevés. Le 28 novembre 2019 a connu un pic de crue de 15 800 l/s. Au contraire, juillet, août et septembre avaient été nettement inférieurs à la normale, l'indigence étant particulièrement accentuée en août 2019, qui n'a écoulé que 156 l/s en moyenne, tombant à 108 l/s le 23 du mois.

L'étang d'Uzurat barre l'Aurence bien plus en amont que la station hydrométrique d'Isle. Il draine en effet un bassin de seulement 32 km² (Reix et Bidault, 2017). A un peu plus de 200 m en aval de la chaussée de l'étang, au niveau du seuil du Moulin Pinard, à une altitude de 290 m, une station hydrométrique a fonctionné pendant 31 ans, de 1965 à 1996, sous le code L0614010. Pendant cette trentennale, les modules brut et spécifique de l'Aurence étaient de 577 litres par seconde et, pour un bassin de 35,1 km², 16,4 l/s/km². Les débits moyens mensuels les plus haut et bas étaient de 1040 l/s (coefficient de débit de 1,80) en février et 187 l/s (coefficient de débit de 0,32) en septembre, si bien que le coefficient de pondération était de 5,56.

Avant les travaux récents, l'étang d'Uzurat s'étendait sur 8,5 ha (**fig. 2**), sa longueur était de 580 m, sa profondeur maximale de 4,3 m et son volume d'eau « hors queue de retenue » de 158 000 m³ à la cote 297,2 m (Reix et Bidault, 2017).

Avant la présente recherche, la température de l'eau de l'Aurence n'avait jamais été enregistrée en continu au niveau de l'étang d'Uzurat. En revanche, elle était mesurée pour le compte de l'Agence de l'eau, à six reprises chaque année depuis 2007, en février, avril, juin, août, octobre et décembre, à un endroit situé tout à fait en aval, juste avant le confluent avec la Vienne. Il s'agit, sur la commune d'Aixe-sur-Vienne, de la station d'Arliquet, dont le code est 04079700 pour le Réseau de contrôle de surveillance des eaux douces de surface. Il est à noter que le maximum annuel retenu correspond à la mesure ponctuelle d'août. Sur douze ans, cette température aoûtienne fut la plus basse à 15,8 °C en 2016 et la plus haute à 20,6 °C en 2018 (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2018).

1.2. D'une rivière productive à une coulée verte et bleue : des moulins aux étangs

Chronologiquement, l'Aurence a d'abord joué un rôle passif dans le site initial de Limoges, ville qui regardait vers le midi, gravissant le versant de la Vienne exposé au sud-est. Ce talus remonte vers le nord-ouest jusqu'à l'échine de Beaublanc, du Vigenal et de Louyat. Or celle-ci est un lambeau de la surface d'aplanissement oligo-miocène du plateau de Limoges¹, qui n'est autre que la ligne de partage des eaux avec l'Aurence. Cette configuration géomorphologique a pu faire dire à l'historien J. Levet (1974, p. 11) que « Limoges est édifiée sur le flanc sud de ces coteaux, barrière entre l'Aurence et la Vienne ». L'Aurence est devenue cette petite rivière formant la frontière naturelle septentrionale de Limoges, coulant par endroit à moins de 3 km du cœur historique de la ville, où les Limougeauds se rendaient pour accueillir les hôtes de marque venus du nord². Encore aujourd'hui, la limite communale entre Limoges et Couzeix suit ce modeste cours d'eau. Cette proximité de la ville a d'abord favorisé le développement de petites industries utilisant sa force motrice. Puis l'étalement urbain a rejoint, et

¹ C'est « la surface d'érosion correspondant au cycle IV [...], en gros une surface miocène » d'Aimé Perpillou (1940, p. 80).

² Il en fut ainsi de Marin de Montchenu, premier maître d'hôtel de François Ier. « Fest son entré en ceste ville ce vingtième jour de septembre présente année 1532, lequel fut reçus honorablement de bon vouloir par messieurs les sus-dit Consuls, boschiers, manans et habitans de ceste ville, allèrent au devant de luy jusque pré de la rivière Laurence » (Hévrás, 1984, p. 89).

même franchi, le court affluent de la Vienne. Alors, remplaçant fabriques et moulins fermés, les espaces de loisirs et de détente pour les citadins y furent installés.

Le modelé en creux du Haut Limousin se prêtait à une mise en valeur contrastée qui, sans aller jusqu'à l'opposition entre les vrais alvéoles et cloisons granitiques de la Montagne Limousine, s'en rapproche dans les roches métamorphiques des bas plateaux « pour donner des séries de collines aux flancs surbaissés et des vallons en berceau peu marqués » (Valadas, 1984, p. 25), si bien que « les ruisseaux naissent dans des vallons évasés, se resserrant vers l'aval » (André *et al.*, 1994, p. 22). De fait, la vallée de l'Aurence voyait traditionnellement s'enchaîner les prairies de fauche dans les séquences élargies et les moulins dans les gorges, les équipements hydrauliques de ceux-ci débordant dans les segments évasés. Ainsi, depuis de nombreux siècles, les Limousins ont aménagé le lit de l'Aurence sur toute la largeur de sa petite plaine alluviale, détournant des bras, dérivant des chenaux, construisant seuils, biefs d'amenée et canaux de fuite. De la sorte, faisant se succéder les moulins, l'Aurence est très tôt devenue une « fausse rivière » (Giret, 2014, p. 71). Les auteurs des premières années du XIX^{ème} siècle ne manquaient pas de vanter les mérites des laines fabriquées dans les filatures hydrauliques de l'Aurence³ (Juge, 1817, Barny de Romanet, 1821).

Plus précisément, sur les trois kilomètres courant aujourd'hui de l'amont de l'étang d'Uzurat à la chaussée de l'étang du Mas Gigou, utilisant les resserrments de la vallée dans les anatexites, on voyait se succéder les moulins de Brachaud, de la Tour, Pinard et Mouriqué, dont les équipements étaient tels que les bras détournés et artificialisés formaient un linéaire fluvial plus long que les segments de l'Aurence sans aménagement. Dès les années 1840, cet endroit sembla être approprié à la création d'un étang, voire d'un lac de 200 ha et 20 m de profondeur, qui aurait eu une triple destination, « l'irrigation rurale, la création d'une force motrice dans Limoges, l'approvisionnement d'eau pour les besoins domestiques et industriels » (Brocchi, 1843, p. 62). Le site de l'édification de la digue projetée par Isaac Albert Malevergne de Lafaye en 1843 coïncidait exactement avec l'actuelle chaussée⁴, la différence étant dans la taille finalement plus réduite de la construction cent quarante ans plus tard.

Dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle, le val de l'Aurence prit peu à peu l'image d'une coulée verte⁵, à préserver au milieu d'un territoire de plus en plus urbanisé. Dans la partie aval, sur la commune d'Isle, le fond de la vallée de l'Aurence et ses versants sont inventoriés en Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique. Cette ZNIEFF de type 1, qui existe essentiellement du fait de la présence reconnue d'une fougère et d'un arbrisseau sempervirent, la Scolopendre et le Daphné lauréole, s'étend sur 76,2 ha (Chabrol, 2018). Dans Limoges même, la protection de l'Aurence fut envisagée en même temps que la construction de la ZUP du même nom, à partir de 1965. Sous l'impulsion volontariste des adjoints à l'urbanisme et aux espaces verts de la mairie de Limoges et aussi du fait de certaines opportunités accidentelles⁶, une succession d'espaces verts allongés, bordant l'Aurence, furent ouverts à partir des années 1970. D'amont en aval, ce sont les parcs du Moulin Pinard, de l'Aurence I, de l'Aurence II, et celui du Mas-Jambost surplombé par la roseraie municipale. Surmontée de ZUP et de ZAC, bordée de la « Zone industrielle nord », la plus grande de l'agglomération limougeaude, l'Aurence est « une rescapée, [voire] une vallée miraculée » (M. Kiener, comm. écr. 1^{er} mai 2020). Alors que la logique de l'époque devait conduire à une canalisation de l'Aurence à sa traversée des nouveaux espaces d'activités, « une volonté politique forte la préserva comme rivière sauvage » (M. Kiener, comm. or. 4 mai 2020).

³ « Laporte et Bouillon filature par mécanique hydraulique de laines, pour fabrication de la grosse draperie, couvertures et autres étoffes confectionnées dans le Limousin, sur l'Aurence » (Juge, 1817, p. 59). A Isle : « Chaize-Martin, fils jeune, filature de laines, aux Courrières, sur l'Aurence » (*id.*, p. 60). « Les filatures hydrauliques de laine [...] de Laporte et Bouillon, [...] Chaize-Martin » (Barny de Romanet, 1821, p. 496).

⁴ « A 296 [m]. Sur ce point commence une gorge resserrée ayant une pente rapide » (Malevergne de Lafaye, 1843, p. 7). « Ce dernier point est admirablement disposé pour recevoir une forte digue : il se trouve entre le village du Theil et le moulin de la Tour, sur le territoire de la commune de Beaune, immédiatement au-dessous d'une longue et large vallée [...]. La hauteur à donner à la digue sera déterminée par la capacité à donner au réservoir » (*id.*, p. 8).

⁵ Ou plutôt d'une organisation de « coulées vertes en arêtes de poisson », plusieurs ruisseaux affluents de l'Aurence étant eux-mêmes protégés (M. Kiener, comm. écr. 1^{er} mai 2020). L'ensemble s'inscrivait dans « la mise en place d'une ceinture verte autour de Limoges, destinée à fracturer la nappe urbaine, selon le modèle anglais » (M. Kiener, comm. or. 4 mai 2020).

⁶ « La crue ravageuse de 2003, qui a détruit le pont du Moulin Rabaud, a bloqué des projets de lotissement des flancs jusqu'au cours d'eau lui-même, ses flancs étant par endroits demeurés propriété privée » (M. Kiener, comm. écr. 1^{er} mai 2020).

Cette coulée verte forme un tel symbole pour les Limougeauds que le romancier Franck Linol n'hésite pas à y placer une partie de son intrigue policière. « Comme des générations d'enfants, Valérie avait connu le parc de l'Aurence dès son plus jeune âge. Un havre de paix avec le petit cours d'eau qui serpentait dans les sous-bois, les aires de jeux et surtout le parc animalier » (Linol, 2015). D'ailleurs, à l'instar du présent papier sur les températures de l'eau en juillet et août 2019, l'histoire se passe lors d'un été caniculaire...

Dans ce cadre, il était cohérent de réhabiliter le segment de la vallée de l'Aurence qui s'était jadis trouvé entre les chenaux détournés et aménagés du moulin de la Tour, puis était devenu une carrière⁷ (Lemaire, 2004). La décision de transformer le segment marécageux et abandonné en un plan d'eau de loisirs urbains fut prise en 1975, « en concomitance avec l'achat par la ville des terrains du baron de la Bastide » (M. Kiener, comm. or. 4 mai 2020). Il était fait pour les Limougeauds, mais aussi pour les visiteurs. D'ailleurs, le seul camping de Limoges fonctionna sur ses bords pendant plusieurs décennies, jusqu'à sa fermeture définitive en octobre 2018 (Erdan, 2018). L'étang lui-même fut inauguré le 7 mars 1979 (Robert, 2017b). Afin d'améliorer la gestion des niveaux du « lac » et d'améliorer la qualité de l'eau de son émissaire, l'étang avait été équipé au début des années 2000 d'un moine composé de planches en aluminium (Ch. Monteil, comm. or. 13 septembre 2019).

1.3. L'Aurence, un nouveau produit dérivé du lac d'Uzurat

Les textes administratifs qui se sont succédé en France depuis la Directive cadre européenne de 2000 et ont été déclinés dans chaque grand bassin hydrographique ont fini par pratiquement assimiler le bon état écologique des eaux à la restauration de la continuité des cours d'eau, elle-même le plus souvent réduite à l'effacement des obstacles, ou, si leur usage est jugé majeur par les autorités, à leur aménagement. Dans ce contexte, les préconisations du SDAGE Loire-Bretagne ont conduit, par l'intermédiaire du SAGE du bassin de la Vienne, à l'application de cette politique au bassin de l'Aurence.

Après le remplacement des Contrats de restauration et d'entretien par les Contrats territoriaux de milieux aquatiques (CTMA) en 2007 au sein de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, les réflexions aboutirent en 2011 à la signature du « CTMA des bassins versants de l'Aurence et de l'Auzette » pour une durée de cinq ans (Communauté d'agglomération Limoges Métropole, 2011). Ce document détaillait sept objectifs, dont le premier s'intitulait « restauration de la continuité écologique et sédimentaire du cours d'eau » et recensait « 38 ouvrages infranchissables » devant être à terme effacés ou aménagés. Concrètement, la majeure partie du financement du CTMA porterait sur le traitement de 18 d'entre eux. Ainsi, alors que le contrat total était de 4 740 250 euros, la seule « action 1 » dite « effacement/aménagement d'ouvrages transversaux » recevait 2 288 000 euros, tandis que, par exemple, la « gestion des zones humides » recevait moins de 580 000 euros.

Sur la lancée du CTMA, les actions communes se poursuivirent après 2016 et menèrent à la plus importante d'entre elles, celle de la dérivation de l'étang d'Uzurat. Selon la Déclaration d'intérêt général, 1 316 705 euros étaient prévus pour cet aménagement, répartis entre l'Agence de l'eau Loire-Bretagne (60 %) la Région (20 %) et la ville de Limoges 20 % (Egis, 2016, p. 31). La ville était propriétaire du terrain et, avant comme après les travaux, devait s'occuper de la gestion courante du site. Le maître d'ouvrage était la Communauté d'agglomération (devenue communauté urbaine en 2019) de Limoges Métropole, ayant compétence de gestion des milieux aquatiques. Le maître d'œuvre était le bureau d'études Egis Eau. L'essentiel des travaux a été réalisé par la marque de génie écologique du groupe Vinci, Equo Vivo (O. Dom, comm. or. 13 septembre 2019).

Finalement, les travaux, commencés en 2017, se terminèrent au printemps 2019. Le répartiteur nouvellement construit sur l'Aurence doit détourner les deux tiers de l'eau dans la dérivation et laisser un tiers alimenter l'étang d'Uzurat, cependant que, quand le débit naturel de la rivière est inférieur au débit réservé, la totalité est dérivée dans le chenal de contournement et l'étang n'est plus alimenté. Ce dixième du module de l'Aurence est estimé par une règle de proportionnalité à partir de la station hydrométrique d'Isle (Ch. Monteil, comm. or. 13 septembre 2019). Une partie de la dérivation a pris place à l'intérieur de l'ancien étang, le plan d'eau ayant été baissé pour qu'il n'y eût point besoin de

⁷ C'est en 1962 que la commune de Beaune-les-Mines, sur laquelle se trouvait ce site, fut rattachée à la commune de Limoges.

creuser le talus, réduisant ainsi les coûts (comm. or. M. Liets, 13 septembre 2019). De fait, l'étang dans sa nouvelle configuration est moins étendu qu'avant les travaux et il occupe aujourd'hui 8,12 ha (planimétrie Q. Choffel, à partir d'images Maxar Premium).

Pour compléter l'aménagement d'Uzurat et étendre la continuité écologique en contrebas de l'étang, le seuil du Moulin Pinard, à 260 m en aval de la chaussée, a été contourné par la construction d'une passe à poissons à bassins successifs, réalisée quelques mois avant, pour la somme de 29 072 euros (Bidault et Reix, 2017a). Enfin, à 2 km en aval d'Uzurat, la rivière entre toujours dans l'étang du Mas Gigou, dit aussi du Laurentin ou du parc de l'Aurence, qui est retenu par le vieux seuil pluriséculaire du moulin du Mouriqué. Mais il est prévu, pour un coût de 295 284 euros, d'opérer « un dérasement (suppression totale) de l'ouvrage » (Bidault et Reix, 2017b, p. 17), puis de construire « une contre-digue » et « une prise d'eau de fond » (*id.*, p. 19).

Au-delà de l'aménagement lui-même et des travaux effectivement réalisés, le contournement de l'étang d'Uzurat par la construction d'une dérivation à la conception irréprochable et au rendu soigné est devenu, par la force de la communication, un équipement exemplaire. Les esprits avaient été préparés par la présentation des multiples actions de petite taille engagées par le CTMA. Dans son mensuel de mars 2017, le journal de la Communauté d'agglomération de Limoges titrait « des étangs effacés pour le bien-être des cours d'eau » (Robert, 2017a, p. 19) pour présenter la destruction de l'étang de la Bussière qui barrait le cours supérieur de l'Aurence. Habilement, il ne fallut attendre que le numéro suivant, celui d'avril 2017, pour que soit dévoilée « l'opération phare » (Robert, 2017b, p. 17), l'article portant le titre : « Uzurat : une dérivation salutaire ». Le changement d'échelle se manifestait de lui-même par le fait que, cette fois, le contournement concernait un lac. En effet, en termes d'image, ce petit plan d'eau urbain est ainsi nommé dans les documents promotionnels depuis quarante ans.

Selon notre lecture des documents, la construction de cette dérivation modèle fut présentée avec emphase par la communauté d'agglomération, cependant que la municipalité relata l'événement de façon plus contrainte, indiquant que « l'aménagement du plan d'eau passe obligatoirement par une dérivation » (Wasilewski, 2017, p. 20). Les deux piliers de la restauration de la continuité écologique issus de l'agence de l'eau, l'un piscicole, l'autre sédimentaire, sont, d'après nous, présentés selon un équilibre différent par la communauté urbaine et la municipalité. La première, non seulement dans le texte, mais par une imagerie adaptée, le dessin le surenchérisant à la photographie, met fortement en avant le poisson et ne l'évoque que pour sa circulation possible dans la rivière. La seconde ne néglige pas le transit sédimentaire et voit dans la nouvelle dérivation le moyen d'éviter le comblement de l'étang⁸. La différence de hiérarchie thématique se double ainsi d'une différence de finalité pour l'objet géographique.

2. Une méthodologie de mesure de la température de l'eau adaptée à un site urbain

Contrairement aux recherches précédentes concernant l'effet des étangs sur la température des cours d'eau, réalisées en milieu rural (Touchart, 1999, Millot, 2015, Choffel, 2019), l'étang d'Uzurat prend place dans un site urbain de loisirs, très fréquenté, à proximité de la plus grosse zone commerciale de la ville de Limoges, où les risques de vol ou de vandalisme du matériel de recherche scientifique sont considérables. Il n'était donc pas possible de placer de nombreux thermomètres enregistreurs restant en permanence sur le terrain, en particulier dans le milieu découvert de la dérivation, laquelle attirait en outre tous les regards du fait de la nouveauté qu'elle procurait au paysage. C'est pourquoi seuls deux sites de mesures automatiques ont été gardés. Là, les thermomètres enregistreurs présentaient leur avantage habituel, celui de la continuité temporelle, et leur inconvénient classique, celui de leur précision atteignant au mieux le dixième de degré. Tous les autres points de mesures ont donné lieu à des mesures manuelles, avec un thermomètre présentant l'avantage d'une très grande précision, au centième de degré, mais l'inconvénient de la discontinuité temporelle.

⁸ Bien que la municipalité eût procédé à un curage de l'étang une quinzaine d'années avant, elle restait préoccupée depuis longtemps par l'envasement du plan d'eau » (M. Kiener, comm. or. 4 mai 2020).

2.1. Un matériel thermométrique et oxymétrique de précision

Les thermomètres enregistreurs en continu sont des *HoboWater Temperature Pro V2* conçus pour les milieux aquatiques. Leur résolution est au millième de degré, mais leur précision est en fait, selon le constructeur, de deux dixièmes de degré à l'état neuf. La « dérive de stabilité » est d'environ un dixième par an. Les deux thermomètres utilisés pour cette recherche ayant moins de deux ans d'âge, on peut considérer *a priori* qu'ils sont précis à 0,3 °C près. Cependant, cet écart maximum possible étant fourni par le constructeur pour une large plage de température allant de 0 °C jusqu'à 50 °C, on peut espérer que la précision soit meilleure pour des températures essentiellement comprises entre 15 et 20 °C, éloignées des extrêmes.

Pour mieux approcher la vraie valeur de la précision dans le cas des deux thermomètres enregistreurs utilisés, nous avons pris la température de l'eau avec un thermomètre manuel de haute précision au même endroit et au même moment que la mesure automatique à huit reprises. Le résultat est bien meilleur que celui donné théoriquement par le constructeur : il est de six centièmes de degré pour la moyenne des valeurs absolues des écarts (**fig. 3**), et de deux centièmes de degré pour la moyenne des écarts.

Le thermomètre qui a permis de calibrer les thermomètres automatiques est aussi celui que nous avons utilisé pour la prise manuelle des températures à près de deux cents reprises. Il s'agit d'un *Lufft C100* à résistance de platine en montage quatre fils, dont la résolution et la précision sont toutes deux au centième de degré, cette dernière étant garantie par un certificat du service de métrologie d'*Avantec*.

Ainsi, tous les calculs concernant les mesures manuelles ont gardé aux degrés Celsius leurs deux chiffres après la virgule. En revanche, bien que la résolution des thermomètres automatiques soit au millième, leur précision plus faible fait que nous avons arrondi tous les calculs au dixième pour leur affichage, tout en ayant toujours remis les données-source au millième dans chaque calcul. De fait le lecteur peut avoir l'impression d'une erreur là où il n'y en a pas : par exemple, nous affichons un calcul de $0,5 - 0,5 = 0,1$ quand les valeurs mesurées étaient de $0,54 - 0,47 = 0,07$.

La sonde multi-paramètres *Aquaread AP-2000* utilisée pour les mesures d'oxygène dissous emploie une méthode optique (et non pas électrochimique). La gamme de mesure est de 0 à 500 % pour les saturations relatives et de 0 à 50 mg/l pour les teneurs absolues. Les résolutions respectives sont de 0,1 % et 0,01 mg/l, les précisions de $\pm 1\%$ de la lecture entre 0 et 200 %, et de $\pm 10\%$ entre 200 et 500 %. Au moment des mesures, le capteur optique avait moins de deux ans, comme conseillé par le constructeur. Il avait été étalonné la veille des prises de mesures sur le terrain.

2.2. Une localisation des thermomètres fondée sur une démarche géographique

Concernant les 1908 mesures automatiques, les deux thermomètres enregistreurs ont été placés par L. Touchart, Q. Choffel et C. Boussion le 18 juillet 2019 un peu avant 17 h et enlevés par L. Touchart le 27 août un peu après 10 h. Ils ont fonctionné en continu pendant 39 jours complets allant du 19 juillet à 0 h au 26 août à 23 h, augmentés de quelques heures le jour d'avant et le jour d'après. Ainsi, chacun des deux thermomètres a fourni 954 données horaires. Le thermomètre de référence, sans influence de l'étang, a été placé dans la rivière Aurence à 90 m en amont du répartiteur. La localisation du site d'aval a été pensée dans l'optique de mesurer l'effet de l'étang considéré avec son équipement hydraulique complet, comprenant et un moine et une dérivation. Il s'agissait donc de mesurer la température une fois que le mélange entre l'eau issue du moine et l'eau contournant l'étang par le chenal de dérivation avait été effectué, mais, si possible, avant que le rétablissement des qualités fluviales dans la rivière émissaire n'eût commencé. C'est bien l'association des deux influences qui est mesurée, étant entendu que, pris séparément, l'effet de la dérivation et l'effet du moine peuvent selon les moments s'ajouter ou se retrancher. Pour choisir la bonne distance, il a été tenu compte de la bibliographie. La distance de 50 m en aval de « l'installation » avait été préconisée dans l'article 18 du décret n° 77-1133 du 21 septembre 1977 pris pour l'application de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement. Cependant, concernant les étangs de pisciculture, le CEMAGREF avait estimé qu'une distance d'au moins 300 m était préférable

pour obtenir un mélange complet (Jatteau et Duret, 1995)⁹. Un seuil d'1,35 m de hauteur (Bidault et Reix, 2017a), situé à un peu plus de 200 m en aval de la chaussée de l'étang complique la situation et est susceptible de lui-même modifier légèrement la température de l'eau par une micro-stratification, avant même que les deux masses d'eau ne soient mélangées. Il a été décidé de poser le thermomètre automatique à 150 m en aval du seuil, soit à environ 380 m de la sortie de l'étang (**fig. 4**). Entre les deux thermomètres automatiques, la distance du linéaire de la rivière, en suivant le chenal de dérivation, est de 1050 m. Cependant, nous avons ajouté un site de mesures manuelles au niveau du seuil¹⁰.

Concernant les 193 mesures manuelles, elles ont été effectuées par L. Touchart à 19 dates allant du 25 juin au 3 septembre 2019, soit, en moyenne, tous les trois à quatre jours. L'heure médiane de mesure était de 15 h 30, l'heure moyenne de 14 h 20. Les extrêmes horaires, lors de journées où la température de l'air dépassa 35 °C (à Limoges-Bellegarde) et rendait dangereuse une exposition trop longue en plein soleil, furent 10 h 45 et 16 h 45. Pendant quinze journées, les mesures manuelles ont été prises sur huit sites, pendant trois journées sur sept sites, pendant une journée sur quatorze sites. A partir du point 1, qui est le point manuel situé dans l'Aurence en amont de l'étang, exactement au même endroit que le thermomètre automatique, les distances sont les suivantes. Le point 2 est dans le petit bassin devant le répartiteur à 90 m, le point 3 au début du chenal de dérivation à 135 m, le point 4 dans la dérivation à 280 m, le point 5 dans la dérivation à 500 m, le point 6 à la fin de dérivation (dans le deuxième bassin de repos du tronçon à macrorugosités) à 640 m, le point 7 dans l'Aurence juste avant le seuil du Moulin Pinard à 900 m, le point 8 dans l'Aurence à 1050 m, au même endroit que le second thermomètre automatique. Lors des dix-huit journées à (sept ou) huit sites, les mesures ont toujours été effectuées d'aval en amont, en marchant le plus vite possible, si bien qu'une vingtaine de minutes étaient nécessaires entre le site le plus aval et le plus amont. La redescente, sans prendre de mesures sur les (cinq ou) six sites les plus en amont, prenait une dizaine de minutes. L'ensemble de l'aller et retour durant une trentaine de minutes, les deux sites les plus en aval donnaient lieu à une nouvelle mesure à la fin de la campagne. L'écart moyen entre les mesures prises à une demi-heure d'intervalle était de 0,18 °C. Pour garder toute la rigueur méthodologique, nous avons effectué une pondération sur les données brutes. La pondération des deux sites les plus en aval a consisté à faire la moyenne des deux mesures effectuées à une demi-heure d'intervalle. Celle des cinq sites intermédiaires a donné lieu au calcul suivant : l'écart de température entre les deux mesures du site le plus aval a été multiplié par le nombre de minutes qu'il faut pour aller du site le plus en amont au site concerné et divisé par 30. Le résultat de ce calcul a été ajouté à la donnée brute. Pour le site le plus en amont, considéré comme le milieu de la campagne de mesures, la donnée brute a été conservée. Pour les cinq sites intermédiaires, la correction moyenne a été de 0,03 °C pour le plus en amont à 0,13 °C pour le plus en aval. Enfin, lors d'une seule journée, le 3 septembre 2019, six sites manuels ont été ajoutés aux huit précédents, dans l'Aurence à 1290 m (point 9), 1352 m (point 10), 1650 m (point 11), 1850 m (point 12) et 2180 m (point 13) du point 1. Le point 14 a été pris à la sortie de l'étang suivant, celui du Mas Gigou, à 2360 m du point 1. Les mesures sur les six points ont été effectuées d'amont en aval et ont pris cinquante minutes (**fig. 4**).

Aux 193 mesures manuelles précédentes, une campagne de mesures a été ajoutée le 13 septembre par L. Touchart, S. Cailliez et C. Bousson. Cependant, comme elle était destinée à montrer aux étudiants de la licence professionnelle « gestion de l'eau et développement de ses territoires » du Centre d'Etudes Supérieures de Châteauroux le maniement de différents types de sondes, elle a donné des résultats assez peu utilisables, puisque le temps écoulé entre les premières et les dernières mesures fut de plusieurs heures. Son intérêt réside néanmoins dans les mesures de température et d'oxygène

⁹ Dans le « Projet d'arrêté fixant les prescriptions techniques générales applicables aux plans d'eau, y compris en ce qui concerne les modalités de vidange, soumis à autorisation ou à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-3 du code de l'environnement et relevant de la rubrique 3.2.3.0 de la nomenclature annexée à l'article R. 214-1 du code de l'environnement » donnant un appel à consultations publiques du Ministère de la transition écologique et solidaire en février 2020, la « distance de dilution » des rejets en aval des plans d'eau est fixée à 50 m (article 9). Mais, dans « l'arrêté du 1^{er} avril 2008 fixant les règles techniques auxquelles doivent satisfaire les piscicultures d'eau douce soumises à autorisation au titre du livre V du code de l'environnement (rubrique 2130 de la nomenclature des installations classées) », la distance était de 100 m.

¹⁰ La moyenne des écarts entre les températures dans le seuil et en aval du seuil a été de 0,41 °C (plus chaude dans le seuil) sur les 18 mesures manuelles que nous avons prises au cours de l'été (données brutes).

dissous prises pendant un court laps de temps dans le tronçon dit « à macrorugosités » formant la partie terminale du chenal de dérivation.

3. Données brutes, corrigées ou traitées : une présentation des températures à géographie variable

L'expérience que nous ont donnée par ailleurs une vingtaine d'années de mesures de températures de l'eau et leur présentation devant divers publics nous incite à présenter ici nos résultats en les formulant volontairement selon plusieurs manières. En effet, avant même d'être interprétés et discutés, les chiffres eux-mêmes peuvent être exprimés de différentes façons.

Il n'est pas lieu de revenir ici sur le passage des données brutes aux données corrigées, qui a été présenté dans la partie méthodologique et concerne essentiellement la précision des instruments automatiques et le décalage temporel des mesures manuelles, mais de rappeler maintenant que cette correction, elle-même appuyée d'une part sur le calibrage avec un thermomètre de haute précision, d'autre part sur des interpolations entre deux mesures, n'est elle-même pas exempte d'une marge d'erreur. Bien que nous soyons convaincus que nos données corrigées soient, sinon plus proches de la réalité, du moins plus comparables entre elles, l'honnêteté scrupuleuse implique de fournir au lecteur, à chaque fois que cela paraîtra nécessaire, les deux types de données.

Cette recherche s'appuie sur 2 114 mesures inédites de température de l'eau. C'est à la fois beaucoup en absolu et très peu eu égard aux autres étangs que nous étudions, représentant environ un millième de nos données totales prises entre 1997 et 2019. Etant entendu qu'il n'est ni possible ni intéressant de présenter une par une plus de deux mille températures, leur traitement est obligatoire. Il implique cependant des choix. Or, dans une même réunion entre les acteurs de l'eau, un mode d'expression peut être reçu positivement par une partie de l'assistance, comme aidant à la clarté du propos, négativement par une autre, comme contribuant à une manipulation destinée à forcer l'assentiment ; et réciproquement pour le mode d'expression suivant...

A travers trois échelles géographiques, nous offrirons au lecteur, par endroit, la liberté de choisir par lui-même entre plusieurs types de résultats, tout en suggérant celui qui nous semble le plus pertinent pour ne pas sacrifier à la clarté du propos.

3.1. A l'échelle de l'étang d'Uzurat : l'effet cumulé du moine et de la dérivation

3.1.1. Un réchauffement des températures pendant les deux tiers du temps estival

Les 954 heures pendant lesquelles les deux thermomètres enregistreurs ont fonctionné simultanément peuvent être réparties en trois sections : le temps pendant lequel l'ensemble du moine d'étang et de la dérivation a réchauffé l'eau de l'Aurence, celui pendant lequel il l'a refroidie, celui pendant lequel la température est restée inchangée entre l'amont et l'aval (**fig. 5**).

Le mode d'expression le moins polémique est sans doute celui qui s'appuie sur les données brutes dont on garde la résolution au millième de degré. Selon lui, la température est plus froide à l'aval qu'à l'amont pendant 26,5 % du temps (253 h sur 954), exactement inchangée pendant 2,6 % du temps (25 h sur 954), plus chaude pendant 70,9 % du temps (676 h sur 954). Ce mode d'expression fait pourtant dire aux thermomètres enregistreurs ce qu'ils n'ont pas la capacité à mesurer, le principal biais méthodologique résidant dans le fait qu'il minimise le nombre d'heures pendant lesquelles la température est inchangée. Cela n'est pas si grave, dans la mesure où les refroidissements fabriqués de quelques millièmes de degré sont, dans le cas présent, aussi nombreux que les réchauffements fabriqués, ne fournissant ainsi pas plus d'arguments aux partisans de l'un que de l'autre. Mais cela pourrait ne pas être le cas à d'autres périodes ou pour d'autres étangs.

Le mode d'expression le plus rigoureux scientifiquement se trouve être, d'après nous, celui qui arrondit au dixième de degré pour tenir compte de la précision des thermomètres telle que nous l'avons nous-même calibrée. Selon ce mode, la température est plus froide à l'aval qu'à l'amont pendant 21 % du temps (199 h sur 954), exactement inchangée pendant 14 % du temps (138 h sur 954), plus chaude pendant 65 % du temps (617 h sur 954). Un arrondissement à deux dixièmes pourrait aussi être calculé, si l'on voulait le fonder sur la précision donnée par le constructeur.

Le troisième mode d'expression serait certainement le plus parlant, destiné à fixer les esprits de manière binaire. Il consisterait à supprimer des données brutes toutes les valeurs de 0,000 °C et les répartir par moitié dans les deux autres classes. On oppose alors 28 % de refroidissement et 72 % de réchauffement.

Enfin, des classes peuvent être construites à l'intérieur du réchauffement ou du refroidissement, en s'appuyant sur les valeurs cumulées ou non. Par exemple, en valeurs cumulées, un réchauffement supérieur à un demi-degré existe pendant 37 % du temps (351 h sur 954), il est de plus d'un degré pendant 23 % du temps (211 h sur 954). En valeurs non cumulées, un réchauffement compris entre 0,5 et 1 °C existe pendant 13 % du temps total, ce qui correspond à 18 % du temps de réchauffement.

Un défenseur des étangs pourra dire que, au cœur d'un été caniculaire, un plan d'eau bien équipé ne réchauffe l'eau de manière significative que pendant 37 % des heures, c'est-à-dire environ un tiers du temps, tandis que le partisan du tout effacement pourra lui rétorquer qu'il réchauffe l'eau pendant 72 % des heures, c'est-à-dire environ les trois quarts du temps.

3.1.2. Un réchauffement moyen estival de 0,5 °C

La moyenne de température de l'eau de la rivière Aurence calculée sur les 39 jours complets (936 heures) allant du 19 juillet au 26 août 2019 a été de 17,3 °C à l'amont de l'étang d'Uzurat et de 17,9 °C à l'aval. La différence entre les deux, sans arrondir chacun des termes de la soustraction, se lit comme un réchauffement de 0,5 °C dû à l'étang à moine et dérivation. Pendant ces 39 jours, la température de l'air (Météofrance Limoges-Bellegarde) a été de 20,9 °C.

Le maximum maximorum a été de 22,1 °C en amont, le 25 juillet de 18 h à 20 h, et de 24,0 °C en aval, le 25 juillet à 17 h. Le réchauffement instantané maximum a été de 3,0 °C le 25 août à 16 h (pour un amont à 18,0 °C et un aval à 21,0 °C). Ces événements extrêmes de l'Aurence ne sont pas arrivés au moment du maximum de l'air. Le 23 juillet 2019, pendant lequel le record de tous les temps a été battu à la station météorologique de Limoges-Bellegarde, l'Aurence n'atteignait que 21,1 °C à l'amont à 19 h et 22,8 °C à l'aval à 17 h, cependant que le maximum de réchauffement instantané était de 2,2 °C à 16 h.

Le minimum minimorum a été de 13,7 °C en amont, le 22 août à 8 h et 9 h, et de 13,5 °C en aval, le 22 août à 8 h. Le refroidissement instantané maximum a été de 0,5 °C le 26 juillet à 15 h (pour un amont à 19,7 °C et un aval à 19,2 °C), et le même écart a été atteint le 24 août à 6 h et 7 h (pour un amont à 15,3 °C et 15,1 °C et un aval à 14,8 °C et 14,7 °C) et le 26 août à 6 h et 7 h (pour un amont à 17,0 °C et 16,8 °C et un aval à 16,5 °C et 16,3 °C).

3.1.3. Une augmentation des amplitudes diurnes

L'étang d'Uzurat provoque quelques changements dans le cycle diurne moyen de l'eau de la rivière Aurence, calculé sur les 39 jours complets (936 heures) allant du 19 juillet au 26 août 2019.

En heures d'été, à l'amont, les moyennes horaires minimale et maximale arrivent respectivement à 9 h et 19 h (**fig. 6**). A l'aval, elles surviennent à 8 h et 17 h. Ainsi, l'aval est plus proche de la course du soleil, l'amont a une inertie plus grande. En conséquence, la montée prend 10 h et la descente 14 h à l'amont, la montée prend 9 h et la descente 15 h à l'aval. La différence entre la plus haute et la plus basse des 24 moyennes horaires de température est de 2,0 °C à l'amont, contre 3,6 °C à l'aval. L'étang augmente ainsi l'amplitude diurne périodique, au sens de Ch. Péguy (1970), de 1,6 °C.

Le cycle diurne des écarts entre l'aval et l'amont calculé à partir des moyennes horaires montre un refroidissement du cours d'eau par l'étang à moine et à dérivation de minuit à six heures du matin et un réchauffement de sept heures à vingt-trois heures (**fig. 7**). Le refroidissement maximal, de 0,13 °C, arrive à 2 h. Le réchauffement maximum, de 2,00 °C, survient à 16 h. De 14 h à 19 h, l'écart entre l'aval et l'amont est supérieur à 1 °C.

La moyenne des maxima diurnes sur les 39 jours, quelle que soit l'heure à laquelle ceux-ci arrivent, est de 18,4 °C à l'amont et 20,1 °C à l'aval, celle des minima de 16,2 °C à l'amont et 16,3 °C à l'aval. L'amplitude diurne aperiodique, au sens de Ch. Péguy (1970), est ainsi de 2,2 °C à l'amont et 3,8 °C à l'aval. L'étang l'augmente donc de 1,6 °C.

Cependant, au contraire des variations d'une heure à l'autre, qui sont augmentées par l'étang, celles d'un jour à l'autre ne sont pas changées, voire sont légèrement diminuées par le plan d'eau équipé d'un moine et d'une dérivation. Ainsi, la variabilité moyenne interdiurne, qui est selon Ch. Peguy (1970) la moyenne des valeurs absolues des écarts entre deux moyennes diurnes successives, se trouve être de 0,7 °C, à l'amont comme à l'aval, en fait 0,73 à l'amont et 0,66 à l'aval, pouvant se lire comme une diminution de 0,1 °C due à l'étang.

3.2. A l'échelle de la dérivation, un réchauffement moyen de 0,26 °C par 100 m

Les mesures manuelles, effectuées sur 19 jours en 3 points situés à l'intérieur de la dérivation et sur 16 jours en 4 points, montrent une augmentation de la température d'amont en aval. Nous ne présenterons ici que les calculs effectués avec les quatre points, le premier étant au niveau de la passerelle qui franchit le chenal à son tout début, le quatrième se trouvant dans le tronçon à macrorugosités.

La température en données brutes a augmenté en moyenne d'1,31 °C sur les 503 m de linéaire, soit un gradient moyen de réchauffement de 0,26 °C par hectomètre. En données pondérées par le temps mis à marcher entre les points de mesure d'aval en amont, la température a augmenté en moyenne d'1,38 °C, ce qui ne change la valeur du gradient qu'au troisième chiffre après la virgule. Devant la faiblesse des différences entre données brutes et corrigées dans le cas des distances assez courtes situées à l'intérieur de la dérivation, nous ne présenterons pas les infimes variations entre les deux dans la suite du propos à cette échelle géographique, pour ne garder que les valeurs corrigées. L'ajout d'un cinquième point en amont ne change pas le gradient total. Si l'on prend comme point de départ le bassin du répartiteur, la température moyenne en données corrigées augmente d'1,46 °C sur les 546 m de linéaire, soit un gradient moyen de réchauffement de 0,27 °C par hectomètre (**fig. 8**).

Le gradient a eu tendance à augmenter entre le début et la fin de l'été. Les seize jours étant répartis sur exactement deux mois, du 3 juillet au 3 septembre, la comparaison est intéressante. Le gradient a été de 0,22 °C par hectomètre sur le premier mois et 0,34 °C par hectomètre sur le second. Les quatre plus fortes valeurs parmi les seize se trouvent dans les cinq derniers jours de mesure, du 22 août au 3 septembre. Le plus fort gradient, atteignant 0,44 °C par hectomètre, a été calculé lors du dernier jour des mesures, le 3 septembre.

Si l'on segmente les cinq cents mètres de la dérivation en plusieurs tronçons, la répartition géographique des gradients est la suivante. En moyenne, le gradient est fort sur premier tiers, faible sur le deuxième tiers, et redevient fort sur le dernier tiers, qui comprend la passe à macrorugosités.

Enfin, lors d'une journée supplémentaire, le 13 septembre 2019, à 15 h 30, trois mesures de température ont été prises avec le *Lufft C100* à l'intérieur de la passe à macrorugosités, permettant de faire une focale sur ce seul tronçon (**fig. 9**). On y voit la température augmenter de 0,25 °C sur 40 m soit un gradient de 0,62 °C par hectomètre. Ce même jour, quatre mesures d'oxygène dissous ont été prises avec l'*Aquaread AP-2000*. Elles montrent que l'oxygénation en concentration absolue est stable d'amont en aval, les différences en dixièmes de milligrammes n'étant pas significatives, eu égard à la précision de la sonde. Du fait de l'augmentation de la température, cela provoque certes une diminution en saturation relative, mais si faible qu'il n'est pas la peine de la souligner. Cependant, l'absence de variation spatiale ne doit pas masquer le fait que les taux de saturation, autour de 90 %, révèlent une eau de très bonne qualité.

3.3. A l'échelle de l'émissaire, un rétablissement complet des caractères fluviaux avant l'entrée dans le second étang

La campagne du 3 septembre 2019 a permis l'obtention de données sur la totalité du linéaire de l'effluent, de la sortie de l'étang d'Uzurat jusqu'à celle de l'étang suivant du Mas Gigou (**fig. 10**). De façon originale, par rapport aux études habituelles, le point de référence fluvial ne sera pas pris en amont de l'étang, mais sera celui situé le plus en aval à l'intérieur de la dérivation. En effet, dans la mesure où les autorités ont construit une dérivation pour rétablir la continuité, nous considérons que le cours d'eau est désormais formé par la rivière naturelle poursuivie par le chenal de contournement.

En donnée corrigée par le temps effectué pour faire les mesures manuelles, la température au point 6, le plus en aval de la dérivation est de 18,43 °C. L'évacuation de l'étang la réchauffe un peu,

puisqu'elle monte à 18,62 °C au point 7, celui du mélange situé juste en aval de la sortie de l'étang et de la dérivation. C'est le lieu du maximum thermique. Au-delà, les températures brutes¹¹ ne cessent de diminuer d'amont en aval, mais selon des gradients irréguliers. La baisse est d'abord très rapide, puis elle est lente, puis elle redevient assez rapide, pour atteindre une température minimale au point 12, à 800 m en aval du maximum et 960 m en aval de la température fluviale de référence. Cette distance peut être considérée comme celle du rétablissement des caractères fluviaux qui avaient été modifiés par le double aménagement hydraulique d'un chenal artificiel et d'un moine. En revanche, si l'on considère la dérivation comme un segment fluvial à part entière et comme la continuité de la rivière naturelle, la perturbation du seul étang est effacée en seulement 28 m, c'est-à-dire la distance qu'il faut à l'émissaire pour retrouver la température de 18,43 °C. La différence entre ces deux distances devra constituer un point essentiel de la discussion (cf. 4.2.).

Avant cela, il convient de rappeler que, quelques 300 m en aval du point de température minimal, la rivière entre dans un second étang, de moins de deux mètres de profondeur, lequel, n'étant muni ni d'un moine ni d'une dérivation, réchauffe l'eau par un déversoir de surface qui la monte à 19,38 °C, soit 0,76 °C de plus qu'à la sortie de l'étang d'Uzurat et 2,97 °C de plus que l'eau de la rivière à son entrée. Cependant, il est prévu de déraser la digue actuelle à déversoir de l'étang du Mas Gigou (Bidault et Reix, 2017b).

4. Pour une discussion des mérites respectifs de la dérivation, du moine et de l'ombre

4.1. L'effet réussi d'un double équipement : un moine pour l'office de jour, une dérivation pour la nuit

4.1.1. Peut-on démêler les facteurs de la réussite ?

La première hypothèse de travail, selon laquelle le double aménagement du plan d'eau d'Uzurat le place dans la classe d'étangs ayant l'effet thermique le moins prononcé de tous les types sur le cours d'eau, est confirmée. Le réchauffement qu'il provoque sur l'Aurence ne dépasse pas 0,5 °C pour la moyenne du mois le plus chaud, en comparaison des 4 à 4,5 °C dus aux étangs à déversoir et des 3 °C dus aux étangs à moine (Touchart, 2007). C'est une confirmation des travaux de C. Millot (2015), qui avait montré qu'une dérivation seule donnait des résultats très différents selon à quoi elle était associée, la meilleure combinaison étant celle réalisée avec un moine. Au-delà des moyennes, les extrêmes eux-mêmes ne subissent presque aucun décalage dans le temps. Ainsi, les maxima maximorum et minima minimorum arrivent au même moment en amont et en aval. Cette absence de décalage temporel, qui oppose l'effet de l'étang d'Uzurat à celui des étangs à déversoir (Touchart, 2007) ou à moine sans dérivation (Touchart et Bartout, 2010, 2015), montre l'influence du chenal de contournement, qui, de ce point de vue, rétablit manifestement la continuité fluviale.

On peut supposer que cela soit accentué par la grande taille de la dérivation et sa conception soignée. En outre, pendant la majeure partie de l'été 2019, le répartiteur a bloqué l'alimentation de l'étang, faisant passer la totalité de l'eau de l'Aurence dans le chenal de contournement. Au prix d'une forte baisse de niveau de l'étang et d'un réchauffement conséquent de ses littoraux, qui ne seront pas étudiés ici, la température de l'eau fluviale a évité les décalages temporels de ses cycles diurnes.

En revanche, concernant les valeurs de réchauffement, la situation est un peu plus complexe et la moyenne de 0,5 °C masque des différences plus importantes, qui, se contrecarrant l'une l'autre, donnent une résultante en trompe-l'œil. En effet, alors même que le traitement des températures des deux enregistreurs fournit ces résultats encourageants pour la rivière, la focalisation sur celui des deux équipements qui semble à l'origine de cette réussite, le chenal de dérivation, pour lequel nous ne possédons que des mesures ponctuelles prises au moment des maxima diurnes, semble contredire cette analyse préliminaire.

¹¹ Les mesures ayant été prises d'amont en aval dans le seul sens de l'aller, elles n'ont pas pu être corrigées, contrairement à toutes les autres mesures manuelles de cet article. Le linéaire de l'émissaire étant beaucoup plus long et l'accès à certains points de mesure étant plus difficile, donc plus prenant en temps, il a été considéré que la pondération qui aurait résulté d'un aller et retour aurait été trop aléatoire, les variables explicatives n'évoluant pas forcément toutes dans le même sens (temps qui passe, secteurs à l'ombre et au soleil qui ne sont pas les mêmes par les modifications de l'ombre portée avec l'avancement de l'heure, évolution d'amont en aval).

4.1.2. La dérivation au moment des maxima diurnes : un équipement peu efficace

L'hypothèse selon laquelle le petit bassin formé en amont du répartiteur, situé en plein soleil, aurait des températures particulièrement chaudes, a été infirmée. Les températures y sont certes légèrement plus élevées que celles de la rivière forestière qui l'alimente, mais toujours plus basses que celles de la dérivation elle-même. La préservation de sa fraîcheur provient sans doute, malgré sa stagnation apparente, du temps de séjour très court de ses eaux grâce à l'alimentation par l'Aurence.

L'hypothèse selon laquelle la dérivation étant au soleil, elle s'échauffera d'amont en aval, est confirmée. Cependant, par rapport à ce qu'il aurait pu être attendu, (i) d'une part le gradient total est particulièrement élevé, (ii) d'autre part plusieurs gradients assez différents se succèdent selon les tronçons.

(i) Le gradient estival de $0,26\text{ °C} / 100\text{ m}$ sur l'ensemble de la dérivation d'Uzurat mérite d'être comparé avec la seule étude déjà existante, qui, à notre connaissance, a mesuré les températures à l'intérieur de chenaux de contournement d'étangs dans le centre-ouest de la France, c'est-à-dire la thèse de C. Millot (2015). Comme, contrairement à l'étang d'Uzurat, qui est urbain, les étangs suivis par C. Millot étaient ruraux, des thermomètres enregistreurs avaient pu être placés, si bien que non seulement les maxima de journée pouvaient être mesurés, mais aussi les minima de fin de nuit. Dans la dérivation de l'étang des Ribières au Monteil-au-Vicomte, d'une longueur d'un peu plus de 500 m assez proche de celle d'Uzurat, ombrée sur les deux premiers tiers, ensoleillée sur le dernier, l'augmentation de la température du 9 au 17 mai 2014 a été de $0,045\text{ °C} / 100\text{ m}$ pour les maxima diurnes et $0,038\text{ °C} / 100\text{ m}$ pour les minima, du 1^{er} au 8 juillet 2014 elle a été de $0,06\text{ °C} / 100\text{ m}$ pour les maxima diurnes et inexistante pour les minima. Dans la dérivation de l'étang de Gâte-souris à Monchevrievier, d'une longueur de 330 m, il n'y a pas de gradient dans un seul sens, le tronçon du milieu, le seul qui soit à l'ombre, étant à la fois plus froid que l'amont et que l'aval.

Pour élargir la comparaison avec la bibliographie, il convient, à défaut d'autres études centrées sur l'intérieur d'une dérivation d'étang, de prendre les gradients mesurés dans des cours d'eau. En fait, l'essentiel de la bibliographie internationale présente des gradients sur des linéaires beaucoup plus longs, à tel point qu'ils sont exprimés de préférence en fonction de la dénivellation altitudinale, qu'ils proviennent de mesures de températures de l'eau (Bocquet, 1975, Webb et Walling, 1986) ou de modèles mathématiques à partir des températures de l'air (Carraro *et al.*, 2019). Quand l'unité est formulée en fonction de la longueur, elle concerne plutôt des cours d'eau de grande taille, par exemple $0,1\text{ °C}$ par kilomètre dans le cas de rivières de l'Oregon suivies sur 45 à 70 km (Torgersen *et al.*, 2001), $0,2\text{ °C}$ par kilomètre dans des cours d'eau de taille moyenne, par exemple ceux du New Brunswick selon D. Caissie (2006). Quelques études, plus rares, concernent les ruisseaux et les têtes de bassin. A partir de mesures effectuées en continu en juillet et août, M.A. Zwieniecki et M. Newton (1999) donnent une valeur de $0,6\text{ °C}$ par kilomètre pour des petits cours d'eau entièrement sous forêt. Entre avril et juin, Q. Choffel *et al.* (2020) ont trouvé le même gradient pour les maxima diurnes dans un ruisseau vosgien, l'Aspenhal, équipé sur 2 km, sous couvert forestier. Ce gradient de $0,6\text{ °C}$ par kilomètre est exactement le même que celui mesuré dans la dérivation de l'étang des Ribières au Monteil-au-Vicomte par C. Millot en juillet pour l'ensemble des températures.

Ce réchauffement de $0,06\text{ °C}$ par hectomètre est tout de même quatre fois moins fort que celui de la dérivation d'Uzurat. Il est vrai que, à Uzurat, la pente du chenal est faible (en dehors du secteur terminal de rattrapage de la déclivité) et, du moins pour ce premier été suivant la construction, aucune végétation ne peut, ni mitiger l'ensoleillement direct, ni prélever de calories par évapotranspiration. Enfin, l'été 2019 était extrêmement chaud.

(ii) A l'intérieur d'une dérivation tout entière en plein soleil et qui ne fait que se réchauffer d'amont en aval, plusieurs tronçons se distinguent néanmoins. Le fort réchauffement du premier tiers n'est pas surprenant, puisqu'il s'agit du premier tronçon au soleil faisant suite à la rivière qui s'écoulait en amont en milieu forestier. Le gradient moins fort du second segment n'étonne pas non plus, car, bien que celui-ci soit aussi au soleil, on s'attend à une décroissance exponentielle de la valeur du gradient de réchauffement. C'est la forte augmentation dans le dernier tronçon, celui des macrorugosités, qui est quelque peu surprenante. Son étude serait à approfondir dans une future recherche, mais on peut supposer que les trois petits bassins de repos forment des marmites à micro-stratification, dont la surface est surchauffée. La légère baisse de l'oxygénation relative mesurée le 13 septembre pourrait avoir la même origine.

Enfin, la double hypothèse selon laquelle la dérivation serait plus chaude que la rivière naturelle d'amont, mais plus fraîche que la sortie de l'étang, est confirmée dans sa première proposition, mais souffre de nombreuses exceptions dans sa seconde. Ces dernières, surprenantes de prime abord, méritent une étude plus approfondie. Il s'agit de comparer la température du tronçon terminal de la dérivation, soit le point 6 de la passe à macrorugosités, et celle du point 7 situé juste en aval du confluent entre l'eau issue du moine et de la dérivation. Les données brutes sont ici les plus cohérentes à utiliser, car les deux points à comparer sont justement les plus proches. La moyenne sur 16 jours est de 19,75 °C au point 6 et 19,88 °C au point 7. Ces moyennes reflètent le fait que, à dix reprises, l'Aurence en aval de l'étang était plus chaude que la dérivation. Mais les six exceptions ne sont pas rien. En outre, les trois journées supplémentaires de mesures, pendant lesquelles il manque le point 6, sont toutes aussi, si on le remplace par le point 5 pourtant situé plus en amont dans le chenal de contournement, des exceptions. Ainsi, lors de près de la moitié des journées (9 sur 19), le réchauffement attribué à l'étang doublement équipé était plus dû à la dérivation qu'au moine. Ou bien, dit d'une autre manière, l'eau soutirée par le moine de l'étang était plus froide que celle qui avait contourné l'étang par le chenal de dérivation.

Il convient de rappeler que les mesures dans la dérivation ont été faites manuellement, donc en journée. La distorsion avec les mesures automatiques, bien que celles-ci aient été réalisées ailleurs que dans la dérivation, est sans doute due au fait que celles-là correspondent au moment des maxima diurnes. Il est vraisemblable que ce soit la nuit que l'influence de la dérivation soit le plus bénéfique, pour une cause absolue, puisque c'est la période de l'absence de radiation solaire, et aussi pour une cause relative, puisque, en comparaison, on sait (Touchart et Bartout, 2010, 2015) que les moines d'étang ont leur maximum d'effet de réchauffement en fin de nuit. Cette raison relative mérite une étude à part entière.

4.1.3. Moine et dérivation : une complémentarité en fonction des heures

Finalement, si l'influence cumulée de la dérivation et du moine peut être regardée comme une réussite, au sens d'un effet thermique faible de l'étang ainsi équipé sur le cours d'eau, c'est que le chenal de contournement donne de bons résultats la nuit et au petit matin, cependant que le moine fait de même le jour et plus encore l'après-midi, ou bien, dit moins positivement, le moine contrecarre l'effet réchauffant de la dérivation pendant la journée et le soir et la dérivation contrecarre l'effet réchauffant du moine pendant la nuit et le matin. La cause en est sans doute que, en période de fort ensoleillement, la stratification de l'étang est forte, si bien que l'eau du fond de l'étang, préservée du réchauffement des couches superficielles par une thermocline prononcée, est plus fraîche que l'eau courante ensoleillée de la dérivation. D'ailleurs, l'absence de corrélation¹² entre les températures de l'air et de l'eau de l'émissaire juste en aval du plan d'eau montre l'importance du rôle du moine, sachant qu'une eau de fond d'étang voit sa température dépendre des périodes de convection forcée et tend donc à être mieux corrélée avec la force du vent qu'avec la radiation (Touchart et Bartout, 2010, 2015, Touchart *et al.*, 2014, Choffel, 2019).

Cette complémentarité entre les deux équipements de l'étang d'Uzurat, qui n'est qu'effleurée ici, ouvre des perspectives pour de futures recherches. Concernant la dérivation, il s'agira d'effectuer d'autres mesures, lors des étés suivants, une fois que la végétation aura poussé. En effet, comme il avait été prévu (Reix et Bidault, 2017, p. 101), des hélophytes, des aulnes, des saules et des frênes ont été plantés (comm. or. Ch. Monteil, 13 septembre 2019). Quand le chenal sera en partie ombré, le réchauffement sera sans doute plus faible. Il conviendra de suivre l'évolution lors des étés ultérieurs, une fois que le lit artificiel se sera patiné avec le temps et aura pris une allure plus proche d'un paysage « naturel ». On sait que même de simples macrophytes croissant dans le cours d'eau peuvent

¹² Sur les 39 jours complets allant du 19 juillet au 26 août 2019, les températures moyennes diurnes de l'eau de la rivière Aurence (thermomètres automatiques de cette recherche) et de l'air (données Météofrance Limoges-Bellegarde) ne sont corrélées ni en aval de l'étang d'Uzurat (R^2 de 0,47 pour la régression linéaire) ni en amont (R^2 de 0,42 pour la régression linéaire). En amont, l'Aurence reste un petit cours d'eau encore influencé par sa source, donc de température indépendante de celle de l'air (selon la règle générale de K. Smith, 1972). En aval, l'eau de l'Aurence est un mélange de la dérivation qui prolonge cette eau de source et d'une eau de moine dont la température dépend de la convection mécanique de l'étang, donc du brassage par le vent.

provoquer une baisse des températures que d'aucuns comparent à une ripisylve (Willis *et al.*, 2017). Concernant l'étang, il serait intéressant de placer une bouée thermistance mesurant les températures à toutes les profondeurs pour étudier plus en détail les périodes de stratification isolant un hypostagnion frais et les périodes de brassage forcé apportant les calories en profondeur.

En termes de recherche-conseil, nous préconiserions l'utilisation effective du moine dans toutes ses capacités, alors que cela n'a pas été le cas lors de l'été 2019, pendant lequel le gestionnaire, pour éviter une baisse trop rapide de l'étang qui n'était plus alimenté, ne laissait presque plus sortir d'eau à certains moments. Cette gestion provoqua le fait que, à ces moments, les réchauffements maxima dus à la dérivation ensoleillée n'étaient pas tamponnés par les sorties fraîches du fond de l'étang. C'est d'ailleurs pourquoi l'amplitude diurne périodique était augmentée entre les deux thermomètres enregistreurs (**fig. 7**). Un soutirage permanent d'eau de fond en quantité suffisante l'aurait abaissée, comme cela a été montré sur des étangs à moine sans dérivation (Touchart, 2007, Touchart et Bartout, 2011).

4.2. L'effet de l'ombre forestière sur le refroidissement de l'émissaire

L'existence d'une seule campagne de mesures doit inciter à une interprétation prudente des données, tenant plus de la discussion que de la conclusion. Il est cependant possible d'avancer que l'hypothèse selon laquelle l'émissaire doit se refroidir régulièrement d'amont en aval, que cela se fasse de façon linéaire ou en suivant une courbe décroissante exponentielle, est infirmée pour la journée du 3 septembre 2019.

L'évolution de la température de l'émissaire d'amont en aval peut être discutée à travers deux facteurs : la distance à la sortie de l'étang et la couverture végétale. De précédentes recherches en aval d'étangs à déversoir de surface avaient montré, en Limousin, que la taille de l'émissaire permettait de hiérarchiser ces deux facteurs (Touchart, 2007). Un débit élevé, comme celui de la Vézère en aval de l'étang des Oussines, rendait le premier facteur si prédominant que sa mise en équation exponentielle décroissante pouvait rendre le refroidissement à lui seul (Touchart, 2007). Q. Choffel *et al.* (2017) avaient confirmé l'importance des pertes calorifiques sur le premier segment, le plus proche du déversoir, en croisant la température et le débit pour chiffrer les calories du Chavanon en aval de l'étang de la Ramade. En revanche, un faible débit, comme celui du ruisseau du Grand Etang en aval du plan d'eau de Cieux, redonne au second facteur une certaine part, perturbant la tendance au refroidissement d'amont en aval et provoquant même des segments se réchauffant en journée, sur certains tronçons en plein soleil.

L'évolution de la température de rivières qui ne sont pas sous l'effet d'un plan d'eau peut aussi apporter quelques éléments de comparaisons. Dans la bibliographie internationale, il est indiqué que, du fait des modifications induites sur la radiation directe (Sinokrot *et al.*, 1993), les écarts instantanés peuvent être considérables d'un tronçon à l'ombre à un tronçon au soleil sur de toutes petites distances, allant jusqu'à 0,9 °C entre l'entrée et la sortie de la traversée d'une prairie de 365 m par un ruisseau vosgien par ailleurs forestier (Boussion, 2019), voire 1,5 °C en une centaine de mètres (Rutherford *et al.*, 2004). De façon plus théorique, J. Bartholow (2000) a même modélisé une augmentation de 4 °C d'un segment à l'autre. En fait, les secteurs ombrés font baisser les maxima (Johnson, 2004). Mais ils ne changent pratiquement pas les minima (Johnson, 2004), c'est-à-dire, dans une rivière naturelle, les températures du matin (Wawrzyniak *et al.*, 2017).

Cette propriété des rivières naturelles pourrait, selon nous, être étendue aux émissaires de faible débit issus des étangs à déversoir de surface, où la nuit homogénéise les effets sur la température de l'eau, quel que soit le milieu végétal traversé. En revanche, les étangs à moine, lesquels décalent le réchauffement de l'émissaire sur le matin et augmentent fortement les minima (Touchart et Bartout, 2010, 2015), ont un effet différent. C'est pourquoi il est possible que l'évolution des minima de l'Aurence soit influencée aussi par le couvert végétal. C'est une perspective de recherches futures. Toujours est-il que la campagne de l'après-midi du 3 septembre, menée au moment du maximum thermique, montre l'importance de l'influence de l'alternance des secteurs ensoleillés et ombrés.

L'émissaire tout entier de l'étang d'Uzurat traverse une coulée verte arborée. Cependant, dans le détail, quatre segments se succèdent. Le premier est formé d'une mosaïque d'ombre et de soleil où le cours d'eau voit sa température décroître selon un fort gradient. C'est le seul petit tronçon pour lequel la distance à l'étang soit le facteur d'évolution prédominant. Entre les points 8 et 10, la rivière

poursuit sa route à travers une mosaïque de bois et de prairies, mais c'est ici que les gradients de refroidissement sont les plus faibles. L'importance de l'ensoleillement provoque son effet. Entre les points 10 et 12, le cours d'eau passe d'abord sous la voie ferrée par un long tunnel, puis s'écoule sous une forêt dense avant que le paysage ne s'éclaircisse quelque peu. Il s'agit du tronçon marqué par les gradients de décroissance de la température les plus forts en dehors de celui situé en contrebas de l'étang. L'effet d'ombre atteint ici à son maximum. Le dernier segment permet de nouveau au cours d'eau de traverser une mosaïque d'ombre et de soleil. Mais ici, pour la première fois, l'émissaire se réchauffe d'amont en aval. Ce changement réclame de discuter les distances de rétablissement des caractéristiques fluviales de l'Aurence.

La distance à laquelle on estime qu'un cours d'eau a retrouvé ses caractéristiques fluviales après avoir été influencé par un étang peut être évaluée selon plusieurs approches, qui dépendent du choix de la température de référence. *Primo*, celle-ci peut être regardée comme la température du cours d'eau en amont de l'étang, ou, variante de cette première approche, comme la température de l'air (Touchart, 2007). Cette démarche se prête bien à une simulation mathématique ; il vaut mieux l'appliquer quand on possède des enregistrements automatiques de la température de l'émissaire.

Secundo, on considère que l'effet d'un plan d'eau peut se lire comme une anomalie dans le signe du gradient de l'émissaire (Savy, 2006). L'évolution naturelle d'un petit cours d'eau étant de se réchauffer d'amont en aval, l'émissaire est regardé comme étant sous l'effet de l'étang tant qu'il se refroidit. C'est le comportement de l'Aurence sur 800 m en aval de l'étang d'Uzurat. Cette approche sous-tend qu'un cours d'eau coule normalement à l'ombre et qu'un étang soit la seule perturbation anthropique qui puisse contraindre l'eau à subir la radiation directe.

La bibliographie internationale rapporte pourtant que la destruction de la ripisylve pour de multiples raisons, autres que la mise en place d'un plan d'eau, se trouve être la principale cause du réchauffement des cours d'eau (Feller, 1981, Rutherford *et al.*, 1997, Caissie, 2006, Gomi *et al.*, 2006) et qu'il faut parfois une dizaine d'années pour que la repousse végétale parvienne à redonner l'ombre nécessaire au rétablissement de la température initiale (Moore *et al.*, 2005). D'une manière générale, la notion d'anomalie a comme corollaire celle de température d'équilibre. Dans de petits cours d'eau australiens faisant se succéder secteurs ensoleillés et ombrés, J.Ch. Rutherford *et al.* (2004) ont montré qu'il fallait une longueur minimale de 1200 m d'ombre pour que l'eau retrouve sa température d'équilibre. De multiples modèles mathématiques calculent la distance de retour à la température d'équilibre après la traversée d'un segment au soleil et, en fonction de la taille de la rivière, on peut trouver des valeurs d'une dizaine de kilomètres (Bartholow, 2000).

Dans le cas d'Uzurat, l'étang a pris la place d'une ancienne carrière, et l'Aurence, en amont comme en aval, reçoit les eaux d'un bassin largement urbanisé et découvert. C'est pourquoi cette démarche n'est pas toujours la plus adaptée à la réalité et, si elle est utilisée, mériterait d'être rebaptisée de sorte qu'on comprenne qu'il s'agit de l'estimation de la distance de rétablissement de la température fluviale d'ombre.

Tertio, on peut essayer de réfléchir à une nouvelle température de référence, qui prenne en compte le fait qu'un étang à dérivation est censé avoir rétabli la continuité fluviale et ne peut donc être regardé comme un simple plan d'eau à déversoir ou à moine, qui, ayant supprimé le caractère fluvial sur un segment, réclame la reconstitution d'une température de référence plus ou moins théorique. Dans le cas d'un étang à dérivation, il existe au contraire une température réelle à laquelle on peut se reporter, celle de la fin du chenal de contournement. Il suffit alors de mesurer dans l'émissaire la distance à laquelle on retrouve cette dernière. En aval d'Uzurat, elle est à seulement 28 m du premier point de mesure dans l'émissaire. On pourrait créer pour désigner cette nouvelle démarche la notion de distance de rétablissement de la température fluviale au soleil.

4.3. Et si l'on effaçait l'étang ?

Pour estimer l'effet d'un étang sur un cours d'eau, la méthode habituelle consiste à comparer les températures du cours d'eau à l'entrée et à la sortie. Pourtant, cette approche exagère l'influence du plan d'eau, puisqu'elle comporte un biais, ou plutôt une omission. En effet, elle ne prend pas en compte le fait que le cours d'eau se serait réchauffé d'amont en aval même si l'étang n'existait pas, surtout quand il s'agit d'un plan d'eau oblong. Or les étangs barrent, à l'inverse des lacs de barrage, de petits cours d'eau de tête de bassin où le gradient fluvial d'amont en aval est justement beaucoup plus

fort que dans les grands cours d'eau. C'était dans le but de relativiser l'effet propre de l'étang que L. Touchart (2007) avait quantifié la différence existant entre la prise en compte de la température de l'air et celle de la température fluviale d'amont pour effectuer les calculs de rétablissement des caractères fluviaux. Une autre démarche peut être ici discutée.

La longueur de l'étang d'Uzurat donnée dans les documents administratifs, qui est de 530 m (Reix et Bidault, 2017), est en fait la longueur effective maximale au sens limnologique de la ligne droite entre les deux points les plus distants du trait de côte (Håkanson L., 1981). Elle n'est pas celle joignant l'entrée et la sortie actuelles de l'Aurence, qui est de 460 m. Cependant, la distance fluviale qui existait avant la mise en eau de l'étang est encore différente. Sa reconstitution dépend de l'époque à laquelle on veut remonter, car l'Aurence est un cours d'eau aménagé depuis des siècles, dont le cours avait été plusieurs fois modifié. Si l'on prend le lit de la rivière peu avant la construction de l'étang, c'est-à-dire sur la photographie aérienne n° 26 de la mission C1931-0031_1960_F1931-2031_0026 à l'échelle de 1 / 24 846, datant du 31 mai 1960, le linéaire fluvial entre les positions actuelles des deux thermomètres enregistreurs est de 1050 m (travail inédit de S. Cailliez). La même manipulation en géoréférençant le cadastre napoléonien de 1812 donne un linéaire de 1090 m.

Si l'on fait l'hypothèse que l'Aurence sans l'étang d'Uzurat coulerait partout à l'ombre, on peut calculer comment sa température évoluerait, soit en prenant le gradient de 0,06 °C par hectomètre de la bibliographie internationale pour les petits cours d'eau de tête de bassin, soit en calculant le gradient entre les points 12 et 13 de nos mesures, là où l'émissaire recommence à se réchauffer d'amont en aval. Il est en l'occurrence de 0,24 °C sur 330 mètres, soit 0,07 °C par hectomètre. Les quatre calculs possibles (de 1050*0,0006 à 1090*0,0007) donnent une augmentation de la température de la rivière naturelle entre les deux points, avant la construction de l'étang, de 0,63 à 0,76 °C. Pour rappel, l'écart moyen mesuré par nos deux thermomètres automatiques est de 0,5 °C entre l'amont et l'aval.

Si l'on fait l'hypothèse que l'Aurence sans l'étang d'Uzurat coulerait au soleil sur le tronçon occupé aujourd'hui par le plan d'eau, puisqu'il s'agit d'une ancienne carrière, la température de la rivière naturelle augmenterait, en début d'après-midi, de 2,7 à 2,8 °C (de 1050*0,0026 à 1090*0,0026) si l'étang n'existait pas. Le calcul étant opéré à partir d'un gradient mesuré à une heure moyenne de 14 h 20, il est à comparer avec l'écart entre les deux thermomètres enregistreurs exactement à la même heure, soit 1,3 °C. Ainsi, quelques deux heures avant le maximum diurne, l'étang équipé réchauffe beaucoup moins l'Aurence qu'elle ne l'aurait fait sans étang en parcourant la même distance au soleil. Ce gain est, à cette heure, essentiellement dû au soutirage profond par le moine, l'action bénéfique de la dérivation ne résidant que dans le raccourcissement artificiel du linéaire.

Enfin, les calculs calorifiques peuvent aussi permettre de faire la part du réchauffement de l'étang sur l'Aurence. Au confluent avec la Vienne, la moyenne thermique d'août de 2007 à 2018 donnée par l'Agence de l'eau Loire-Bretagne à la station d'Arliquet est de 18,1 °C. La reconstitution du débit moyen d'août pour un bassin de 94,2 km² à partir de la station hydrométrique d'Isle donne une valeur de 485 l/s. Ce sont donc 8771 kcal/s que l'Aurence apporte à son exutoire. Pour comparaison, nos mesures automatiques ont montré que l'étang d'Uzurat augmentait la température de la rivière de 0,53 °C en août. Pour un bassin de 32 km², les 180 l/s sont ainsi augmentés de 95 kcal. L'étang équipé est donc responsable d'un accroissement de 1,1 % du volume calorifique de l'Aurence à son confluent.

Addendum conclusif

Il est de bon ton de terminer une conclusion en ouvrant des perspectives de recherches ou en indiquant la poursuite qu'il semblerait opportun de donner au présent travail. Il se trouve que le report du colloque pour cause de confinement a permis, ou imposé, qu'un tel bond dans le futur se réalisât effectivement. Pour ne pas nuire à la cohérence de l'article, qui était déjà entièrement finalisé, il a été décidé de ne pas le modifier, mais de construire un addendum.

Ce sont 107 nouvelles mesures de température qui ont été prises manuellement au moyen du *Lufft C100*, du 27 mai au 1^{er} août 2020. Parmi elles, 25 mesures ont été prises aux 8 points de l'année précédente situés entre les étangs d'Uzurat et du Mas Gigou (points 7 à 14), à trois nouvelles dates, les 6, 23 et 29 juillet 2020. Le 6 juillet, une mesure dans la dérivation, au point 6, a été ajoutée. Et 82 mesures ont été prises sur 9 nouveaux sites, tous situés en aval de l'étang du Mas Gigou, notamment

au niveau de la station hydrométrique du Mas de l'Aurence à Isle, mais aussi à Aix juste avant le confluent avec la Vienne, et dans la Vienne elle-même à 750 m en aval du confluent. Pour préserver un laps de temps ne dépassant pas une heure, sur des distances plus grandes que l'année précédente, les 9 sites étaient mesurés de façon tournante, en général 5 sur une même date. Cela a été effectué à dix-sept dates différentes.

Add. 1 : les 1500 premiers mètres en aval de l'étang d'Uzurat

En moyenne des trois dates, la température de sortie de l'étang du Mas Gigou (point 14) était de 1,73 °C plus chaude que celle à son entrée (point 13) et de 1,10 °C plus chaude que celle de la sortie d'Uzurat (point 7). Le mois de juillet 2020 a donc confirmé les mesures de septembre 2019, selon lesquelles l'étang à déversoir de surface qui barre l'Aurence à 1,5 km en aval de celui d'Uzurat a une influence plus grande que celui-ci, puisqu'il n'est équipé ni d'un moine ni d'une dérivation.

Les trois campagnes de juillet 2020 ont aussi confirmé que l'effet de l'étang d'Uzurat sur le cours d'eau était perdu bien avant l'entrée dans le second étang. Les mesures du 23 juillet 2020 à 15 h 15 ont validé celles de 2019, c'est-à-dire que la distance de rétablissement de la température fluviale à l'ombre a été d'environ 800 m, le refroidissement du cours d'eau s'étant produit entre les points 7 et 12. Les deux autres dates montrent que la succession de tronçons ensoleillés et ombragés traversés par l'émissaire a une influence encore plus grande que celle mesurée en 2019.

D'une part, aux heures les plus chaudes des journées à forte insolation directe, le moine de l'étang rafraîchit le cours d'eau dans des proportions similaires à celles d'un tronçon fluvial à l'ombre. Ce n'est pas l'étang qui détermine le réchauffement de la rivière, mais les tronçons au soleil, et, de ce point de vue, la dérivation en est un. Ainsi, le 6 juillet 2020 à 15 h 15, la température mesurée dans la dérivation (au point 6) était plus chaude que toutes celles situées en aval, y compris celle de sortie de l'étang (point 7). Le moine de l'étang fournissait donc une eau plus fraîche que celle du chenal de contournement, si bien qu'aucune distance de rétablissement de la température fluviale au soleil n'était calculable. Cet indice, nouvellement créé dans cet article, n'est prévu que si l'étang réchauffe l'eau du cours d'eau. Quant à la distance de rétablissement de la température fluviale à l'ombre, elle peut être estimée à cette date à 400 m, puisque le refroidissement du cours d'eau n'a eu lieu qu'entre les points 7 et 9.

D'autre part, dès que la soirée arrive, ou lors de journées plus couvertes ou orageuses, il se produit assez rapidement une certaine uniformisation thermique de l'émissaire. Ainsi, le 29 juillet à 17 h 30, la plupart des tronçons se trouvaient déjà à l'ombre. Les différences de température étaient beaucoup plus faibles que lors des campagnes précédentes. La température augmentait de 0,15 °C de la sortie de l'étang d'Uzurat (point 7) jusqu'à 450 m en aval (point 10), puis baissait de 0,48 °C jusqu'à l'entrée de l'étang du Mas Gigou (point 13), où elle était donc de 0,33 °C plus faible qu'à la sortie de l'étang d'Uzurat, soit un gradient total de moins de 0,03 °C de refroidissement par hectomètre.

Add. 2 : les 17 kilomètres en aval de l'étang d'Uzurat

Les 9 nouveaux points situés plus loin en aval, jusqu'au confluent dans la Vienne, permettent de prendre du recul, à une échelle cartographique plus petite.

Pendant l'été 2020, à quatorze dates différentes, les températures ont été mesurées entre la sortie de l'étang d'Uzurat (point 7) et la passerelle du stade d'Arliquet à Aix, qui se trouve juste avant l'embouchure. Sur cette distance de linéaire de cours d'eau de 15 900 m, le refroidissement moyen¹³ a été de 0,38 °C, soit un gradient de -0,024 °C par km.

A l'intérieur de ce linéaire total, des points intermédiaires permettent d'affiner l'évolution. A quatorze dates différentes, les températures ont été mesurées à la station hydrométrique du Mas de l'Aurence d'Isle. Sur cette distance de linéaire de cours d'eau de 10 550 m, le réchauffement moyen¹⁴ par rapport à la sortie de l'étang d'Uzurat (point 7) a été de 0,44 °C, soit un gradient de + 0,042°C par

¹³ En fait, l'eau était plus froide à l'embouchure de l'Aurence qu'à la sortie d'Uzurat à dix reprises, mais plus chaude à quatre reprises.

¹⁴ En fait, l'eau était plus chaude à la station hydrométrique du Mas de l'Aurence qu'à la sortie d'Uzurat à douze reprises, mais plus froide à deux reprises.

km. Plusieurs autres sites intermédiaires ont tourné selon les dates, celui du pont D79 en aval du Moulin Blanc, à 8560 m en aval de la sortie de l'étang d'Uzurat (point 7), c'est-à-dire à l'endroit où la rivière quitte les terrains urbanisés, étant intéressant, en ce sens qu'il a toujours eu (soit cinq fois sur cinq) les plus fortes valeurs de tout le linéaire, soit en moyenne 1,28 °C de plus qu'à la sortie de l'étang. Un cumul de tous les sites les plus notables peut être cartographié pour trois dates (fig. 11).

De toute façon, l'Aurence se jette dans la Vienne. Or, lors des huit dates pendant lesquelles nous avons pris la température de celle-ci, elle était plus chaude que celle de l'Aurence, tant à la sortie de l'étang d'Uzurat que, *a fortiori*, à l'embouchure. La moyenne de la Vienne était de 18,99 °C, celle du point 7 de 17,89 °C, soit un écart de 1,10 °C.

En conclusion, les données de l'été 2020 recadrent les précédentes dans un espace plus grand. Elles autorisent à considérer l'étang à dérivation d'Uzurat comme l'un des multiples lieux, plus ou moins aménagés, faisant varier la température de l'eau d'amont en aval, le long d'une rivière construite depuis des siècles. La succession de l'entrée de ruisseaux tributaires, l'alternance de surfaces boisées et urbanisées, de terrains d'infiltration et de ruissellement sur l'asphalte, de tronçons à l'ombre et au soleil, de biefs, de seuils, de moulins¹⁵, de chenaux, compliquent l'évolution thermique d'amont en aval. Cependant, si l'on lisse les aspérités, l'Aurence tend à se réchauffer sur les trois premiers quarts de son linéaire, de sa source à 22 ou 23 km en aval, puis, à peu près à partir de l'endroit où elle sort de l'espace urbanisé de l'agglomération limougeaude et du tronçon de vallée le plus élargi, dans les gneiss feuilletés, à se refroidir sur 7 à 8 km. Le vaste étang d'Uzurat, muni d'un moine et contourné par une dérivation subissant l'insolation directe, contribue, modérément, au réchauffement de la rivière, lequel continue à croître, pour d'autres raisons, sur une huitaine de kilomètres en aval de la chaussée. Quoi qu'il en soit, malgré ses multiples installations et aménagements humains, la température de l'Aurence reste toujours plus froide que celle du grand cours d'eau, large et ouvert à l'ensoleillement, et lui aussi fortement aménagé, qu'est la Vienne, dans lequel tout aboutit.

Bibliographie

- Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2018, *Evolution 2007-2018 de l'état des cours d'eau. Station 04079700 – Aurence à Aix-sur-Vienne*. http://carmen.developpement-durable.gouv.fr/IHM/metadata/AELB/Publication/FICHES_STATION/04079700.pdf
- André M.-F., Bernard-Allée Ph. et Valadas B., 1994, « Géomorphologie » in Bernard-Allée Ph., André M.-F. et Pallier G., *Atlas du Limousin*. Limoges, Pulim, 166 p. : 20-23.
- Barny de Romanet J.A.A., 1821, *Histoire de Limoges et du Haut et Bas Limousin*. Limoges, Barbou Frères, 496 p.
- Bartholow J., 2000, "Estimating cumulative effects of clearcutting on stream temperatures" *Rivers*, 7(4): 284-297.
- Bernard-Allée Ph., 1994, « Climat et ressources en eau » in Bernard-Allée Ph., André M.-F. et Pallier G., *Atlas du Limousin*. Limoges, Pulim, 166 p. : 12-15.
- Bidault D. et Reix G., 2017a, *Etude technico-économique préalable à l'aménagement/effacement d'ouvrages transversaux sur les bassins versants de l'Aurence et de l'Auzette. Etudes d'Avant-Projet. Moulin Pinard (AUR SEI2), étude projet, version 1*. Limoges Métropole et Egis Eau, 26 p.
- Bidault D. et Reix G., 2017b, *Etude technico-économique préalable à l'aménagement/effacement d'ouvrages transversaux sur les bassins versants de l'Aurence et de l'Auzette. Seuil digue étang – Parc de l'Aurence I (AUR SEI3), étude projet, version 1*. Limoges Métropole et Egis Eau, 22 p.
- Bocquet G., 1975, « Les températures des eaux et leur évolution dans le bassin d'alimentation de la haute Romanche (Mesures et essai d'interprétation) » *Revue de géographie alpine*, 63(2) : 205-224.

¹⁵ Nos mesures juste en amont et en aval du seuil du moulin de Barrat (Aixe, Arliquet, 15 750 m en aval du point 7) à six dates différentes, entre le 28 mai et le 1^{er} août 2020, donnent un réchauffement moyen de 0,17 °C (17,88 °C en amont, 18,05 °C en aval), l'écart maximum ayant été de 0,27 °C le 1^{er} août, l'écart minimum de 0,05 °C le 4 juin. Pour comparaison, sur les 700 m précédents, de l'aval du moulin Boussous à l'amont du moulin de Barrat, le réchauffement moyen a été de 0,10 °C.

- Boussion C., 2019, *Etude de l'influence thermique des retenues et de la ripisylve sur les cours d'eau*. Univ. Orléans, rapport LPro Gestion de l'eau et développement des territoires, 67 p.
- Brocchi M., 1843, « Rapport fait à la Société d'agriculture sur ce projet » *Bulletin de la Société royale d'agriculture, des sciences et des arts de Limoges* : 61-72.
- Caissie D., 2006, "The thermal regime of rivers: a review" *Freshwater Biology*, 51: 1389-1406.
- Carraro L., Toffolon M., Rinaldo A. and Bertuzzo E., 2019, "SESTET: a spatially explicit stream temperature model based on equilibrium temperature" *Hydrological Processes*, 34, 2: 355-369.
- Chabrol L., Espaces Naturels du Limousin, 2018, *Vallée de l'Aurence au Meynieux (Identifiant national : 740002775, ZNIEFF Continentale de type 1, Identifiant régional : 87000060)*. Paris, INPN, SPN-MNHN, 28 p.
- Choffel Q., 2019, *La différenciation des masses d'eau à l'intérieur de l'étang : stratification verticale, zonation horizontale, bilan thermique et centre thermique (étangs limousins et vosgiens, comparaisons internationales)*. Université d'Orléans, thèse de doctorat en géographie, 404 p.
- Choffel Q., Bartout P., Touchart L. & Aldomany M., 2017, « La Ramade, un étang-frontière aux marges de la retenue de Bort-les-Orgues mais au cœur des problématiques environnementales » in *Marches, limites, frontières en France centrale*. Guéret, Société des sciences naturelles, archéologiques et historiques de la Creuse, Etudes creusoises n° XXIV, Actes du LXXIII^e congrès de la Fédération des sociétés savantes du centre de la France, Guéret, 19-20-21 mai 2017, 180 p. : 19-29.
- Choffel Q., Cairault A., Donati F., Cailliez, Bartout P. et Touchart L., 2020, « Analyse des échanges thermiques entre les étangs et le réseau hydrographique du bassin versant de la Zinsel du Nord : contribution à la différenciation entre les impacts isolés et cumulés des plans d'eau » *Annales de la réserve de Biosphère Transfrontalière*.
- Communauté d'agglomération Limoges Métropole, maître d'ouvrage, 2011, *Contrat territorial milieux aquatiques des bassins versants de l'Aurence et de l'Auzette 2011 / 2015*. Communauté d'agglomération Limoges Métropole, Agence de l'eau Loire-Bretagne, Conseil régional Limousin, 17 p.
- Egis, Ville de Limoges et Limoges Métropole, 2016, *Mise en dérivation du plan d'eau d'Uzurat. Déclaration d'Intérêt Général au titre de l'article L. 211-7 du Code de l'Environnement. Dossier préalable d'enquête publique. Version 1*, 45 p.
- Erda J., 2018, « Limoges : la fermeture du camping d'Uzurat laissera un grand vide touristique » *France Bleu Limousin*, 22 octobre 2018 à 6:01, <https://www.francebleu.fr/infos/economie-social/limoges-la-fermeture-du-camping-d-uzurat-laissera-un-grand-vide-touristique-1540112122>
- Estienne P., 1956, *Recherches sur le climat du Massif Central français*. Paris, Secrétariat général à l'aviation civile et commerciale, Mémorial de la météorologie nationale n° 43, 242 p.
- Estienne P. et Godard A., 1970, *Climatologie*. Paris, Armand Colin, col. U, 368 p.
- Feller M.C., 1981, "Effects of clearcutting and slashburning on stream chemistry in southwestern British Columbia" *Water Resources Bulletin*, 17: 863-867.
- Giret A., 2014, *Environnement, énergie hydraulique, différentes formes, aménagements*. Paris, Ellipses, 186 p.
- Gomi T., Moore R.D. and Dhakal A.S., 2006, "Headwater stream temperature response to clear-cut harvesting with different riparian treatments, coastal British Columbia, Canada" *Water Resources Research*, 42(8): 11 p.
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005WR004162>
- Guilcher A., 1979, *Précis d'hydrologie marine et continentale*. Paris, Masson, 2^e éd., 344 p.
- Håkanson L., 1981, *A Manual of Lake Morphometry*. Berlin, Springer, 78 p.
- Hévras J., 1984, *Les bouchers de Limoges*. La Geneytouse, Lucien Souny, 246 p.
- Jatteau P. et Duret J., 1995, *Evaluation de l'impact des piscicultures de la Nive et de ses affluents*. Bordeaux, Cemagref, étude n° 4, 55 p.
- Johnson S.L., 2004, "Factors influencing stream temperatures in small streams: substrate effects and a shading experiment" *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 61: 913-923.
- Juge J.J., 1817, *Changemens survenus dans les mœurs des habitants de Limoges, depuis une cinquantaine d'années*. Limoges, J.-B. Bargeas, 2^{ème} éd., 231 p.

- Lemaire C., 2004, *La vie urbaine des étangs en Limousin*. Univ. Limoges, mémoire de DEA de géographie, 148 p.
- Levet J., 1974, *Histoire de Limoges. Tome I, des origines à la fin de l'Ancien Régime*. Limoges, René Dessagne, 296 p.
- Linol F., 2015, *La onzième carcasse. Mystères à la morgue de Limoges*. La Crèche, Geste, 352 p.
- Malevergne de Lafaye I.A., 1843, « Projet d'un canal d'irrigation à dériver de l'Aurance » *Bulletin de la Société royale d'agriculture, des sciences et des arts de Limoges* : 1-29.
- Millot C., 2015, *Les étangs à dérivation, une réponse aux nuisances environnementales ? Etude de sites en barrage de rangs 0, 1, 2 et 4, en Indre, Cher et Creuse*. Univ. Orléans, thèse de doctorat en géographie, 259 p.
- Moore R. D., Spittlehouse D. L. and Story A., 2005, "Riparian microclimate and stream temperature response to forest harvesting: a review", *Journal of the American Water Resources Association*, 41(4): 813-834.
- Péguy Ch. P., 1970, *Précis de climatologie*. Paris, Masson, 2^e éd., 468 p.
- Perpillou A., 1940, *Le Limousin, étude de géographie physique régionale*. Chartres, Durand, 257 p.
- Reix G. et Bidault D., 2017, *Etude pour la mise en dérivation du plan d'eau d'Uzurat. Projet, indice A*. Limoges Métropole et Egis Eau, 108 p. + annexes.
- Robert P., 2017a, Dir. de la publication, « Des étangs effacés pour le bien-être des cours d'eau » *Le Métropol, le journal de l'agglo*, mars, 25 : 19.
- Robert P., 2017b, Dir. de la publication, « Uzurat : une dérivation salutaire » *Le Métropol, le journal de l'agglo*, avril, 26 : 17.
- Rutherford J.C., Blackett S., Blackett C., Saito L. and Davies Colley R.J., 1997, "Predicting the effects of shade on water temperature in small streams" *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 31: 707-721.
- Rutherford J.Ch., Marsh N.A., Davies P.M. and Bunn S.E., 2004, "Effects of patchy shade on stream water temperature: how quickly do small streams heat and cool?" *Marine and Freshwater Research*, 55(8): 737-748.
- 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*. Univ. Limoges, thèse de doctorat en géographie, 383 p.
- Sinokrot B.A. and Stefan H.G., 1993, "Stream temperature dynamics: Measurements and modeling" *Water Resources Research*, 29(7): 2299-2312.
- Smith K., 1972, « River water temperature – an environment review » *Scottish Geographical Magazine*, 88: 211-220.
- Torgersen C.E., Faux R.N., McIntosh B.A., Poage N.J. & Norton D.J., 2001, "Airborne thermal sensing for water temperature assessment in rivers and streams" *Remote Sensing of Environment*, 76: 386-398.
- Touchart L., 1999, « La température de l'eau en Limousin » *Norois*, 46(183) : 441-451.
- Touchart L., 2007, « L'étang et la température de l'eau : un ensemble d'impacts géographiques » in Touchart L., Dir., *Géographie de l'étang, des théories globales aux pratiques locales*. Paris, L'Harmattan, 228 p. : 119-156.
- Touchart L. et Bartout P., 2010, « The influence of monk equipped ponds on the quality of basin head streams, the example of water temperature in Limousin and Berry (France) » *Lakes, reservoirs and Ponds, Romanian Journal of Limnology*, 4 : 81-108.
- Touchart L. et Bartout P., 2011, « La gestion du risque thermique en étang : le cas de la dérivation » *Riscuri și catastrofe*. Cluj-Napoca, Casa Cărții de Știință, vol. 9, an X, n° 1 : 149-161.
- Touchart L. et Bartout P., 2015, « L'influence des étangs à moine sur la qualité des ruisseaux en tête de bassin, l'exemple de la température de l'eau du Limousin et du Berry » in Touchart L., Bartout P. & Motchalova, *Mieux comprendre les étangs. Expériences nationales et internationales du Berry limousin à l'Europe orientale*. Brive, les Monédières, 422 p.: 140-150.
- 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, Universitatea Babeș-Bolyai și Administrația Bazinală de Apă Someș-Tisa.

- Proceedings in Pandi G. and Moldovan F., Ed., *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*. Paris I, thèse de doctorat d'Etat, vol. 1, 458 p.
- Wasilewski M., 2017, in Guérin G., Dir. de la publication, « Lac d'Uzurat: l'Aurence est détournée » *Vivre à Limoges*, le magazine municipal d'information, février : 20.
- Wawrzyniak V., Allemand P., Bailly S., Lejot J. et Piégay H., 2017 “Coupling LiDAR and thermal imagery to model the effects of riparian vegetation shade and groundwater inputs on summer river temperature”, *The Science of the total environment*, 592(Aug 15): 616-626.
- Webb B.W. and Walling D.E., 1986, “Spatial variations of water temperature characteristics and behavior in a Devon river system” *Freshwater Biology*, 16: 585-608.
- Williams O.O., 1968, « Reservoir effect on downstream water temperatures in the upper Delaware river basin » *United States Geological Survey professional Paper*, 600B : 195-199.
- Willis A. D., Nichols A. L., Holmes E. J., Jeffres C. A., Fowler A. C., Babcock C.A. and Deas M.L., 2017, “Seasonal aquatic macrophytes reduce water temperatures via a riverine canopy in a spring-fed stream” *Freshwater Science*, 36(3): 508-522.
- Zwieniecki M.A. and Newton M., 1999, “Influence of Streamside Cover and Stream Features on Temperature Trends in Forested Streams of Western Oregon” *Western Journal of Applied Forestry*, 14(2): 106–113.

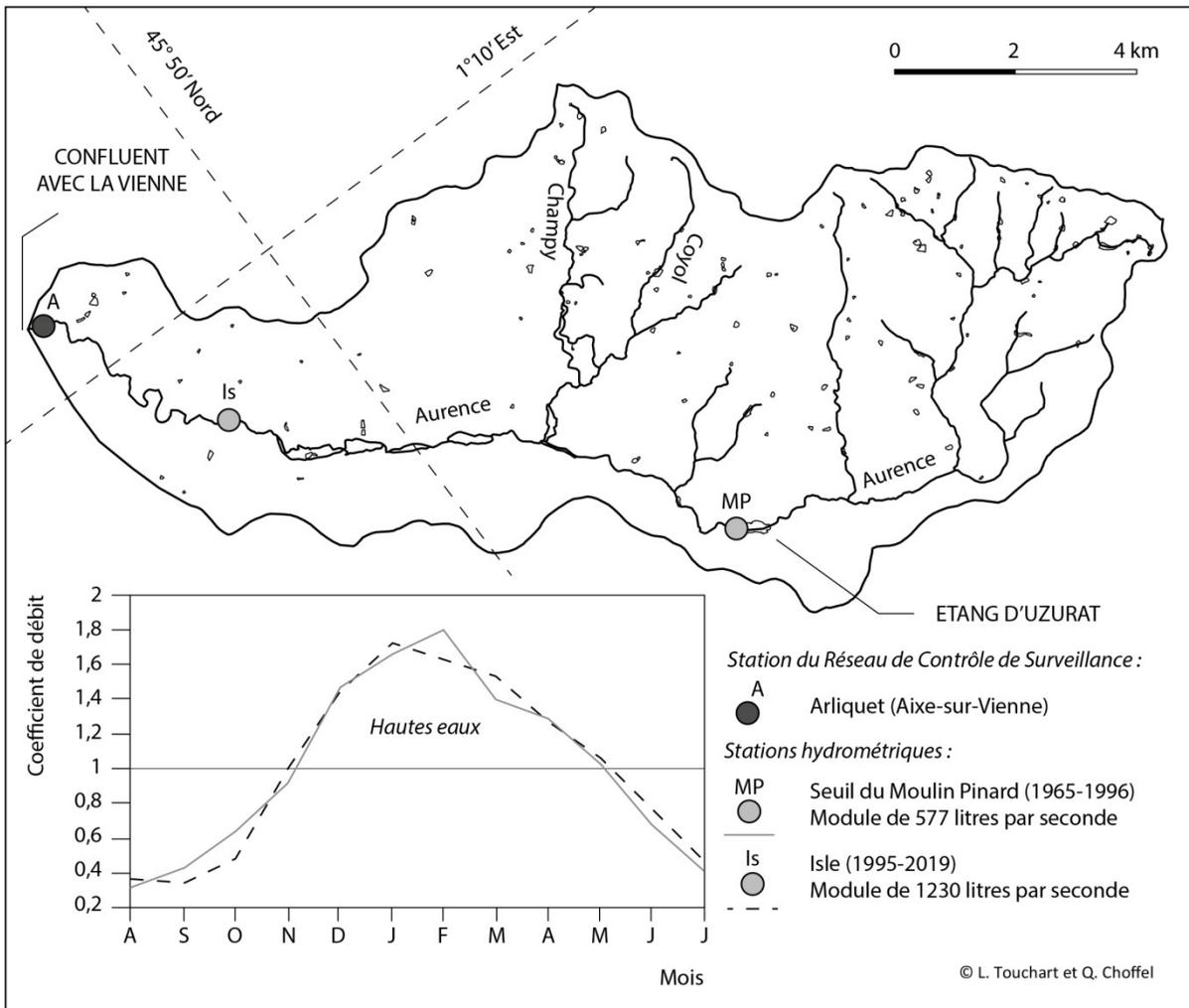


Fig. 1 La rivière Aurence : son régime hydrologique et son bassin
Fig. 1 Hydrological regime and watershed of the Aurence River

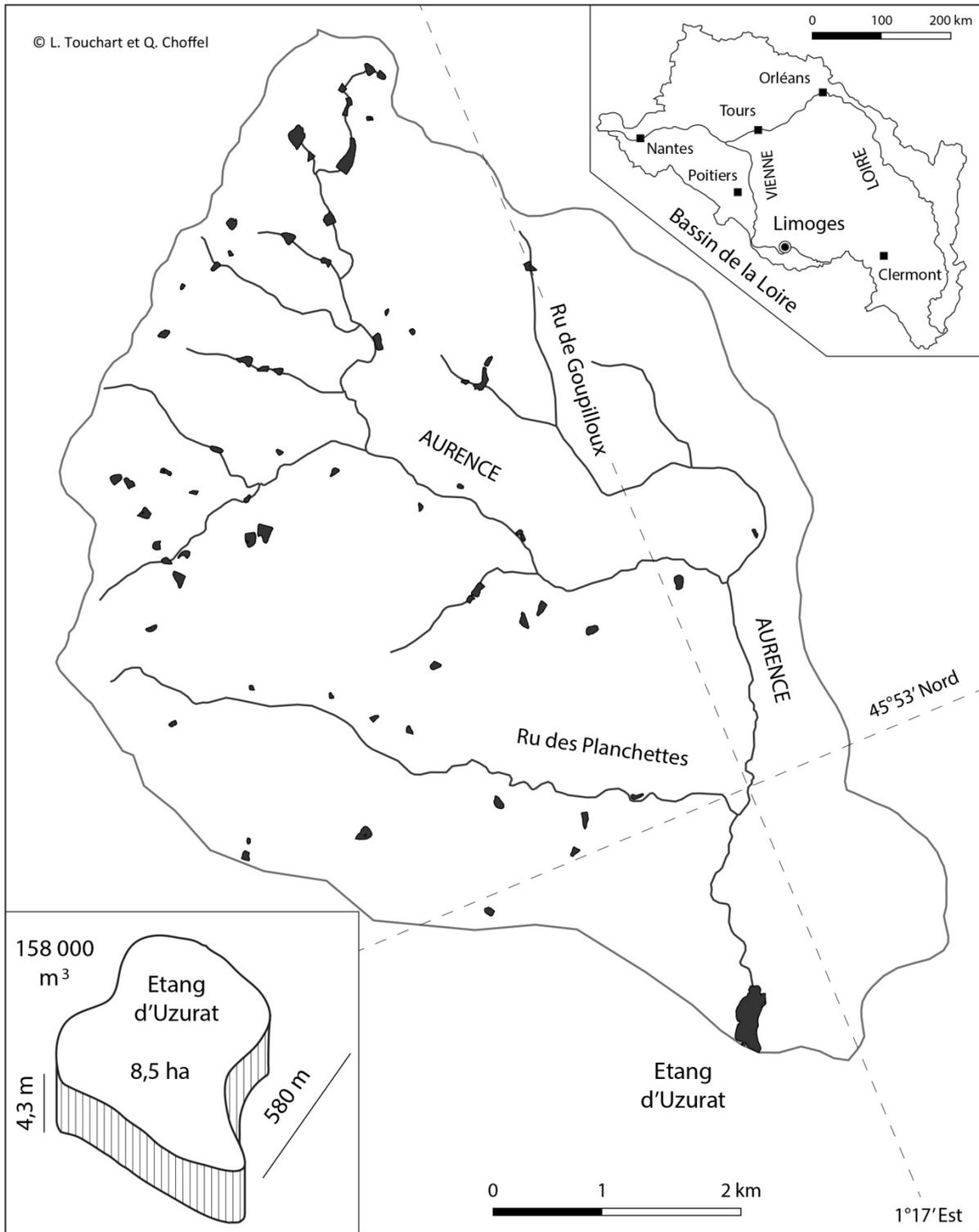


Fig. 2 L'étang d'Uzurat : sa morphométrie et son bassin
Fig.2 Morphometry and watershed of the Uzurat pond

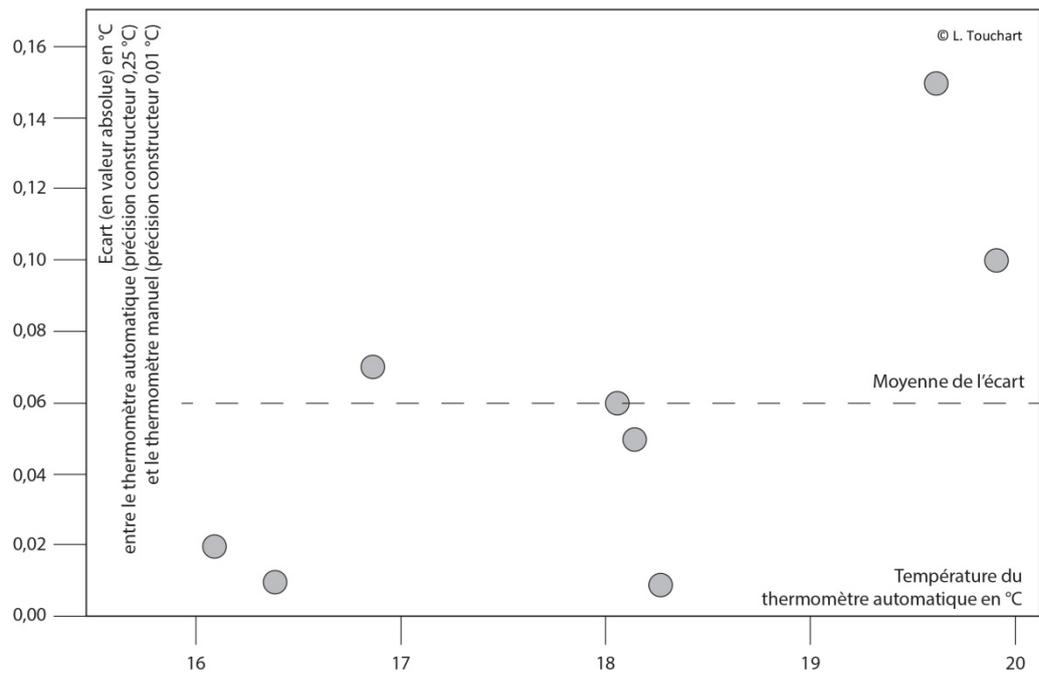


Fig. 3 Une précision des thermomètres enregistreurs à six centièmes de degré
Fig. 3 An accuracy of recording thermometers close to six hundredths of a degree

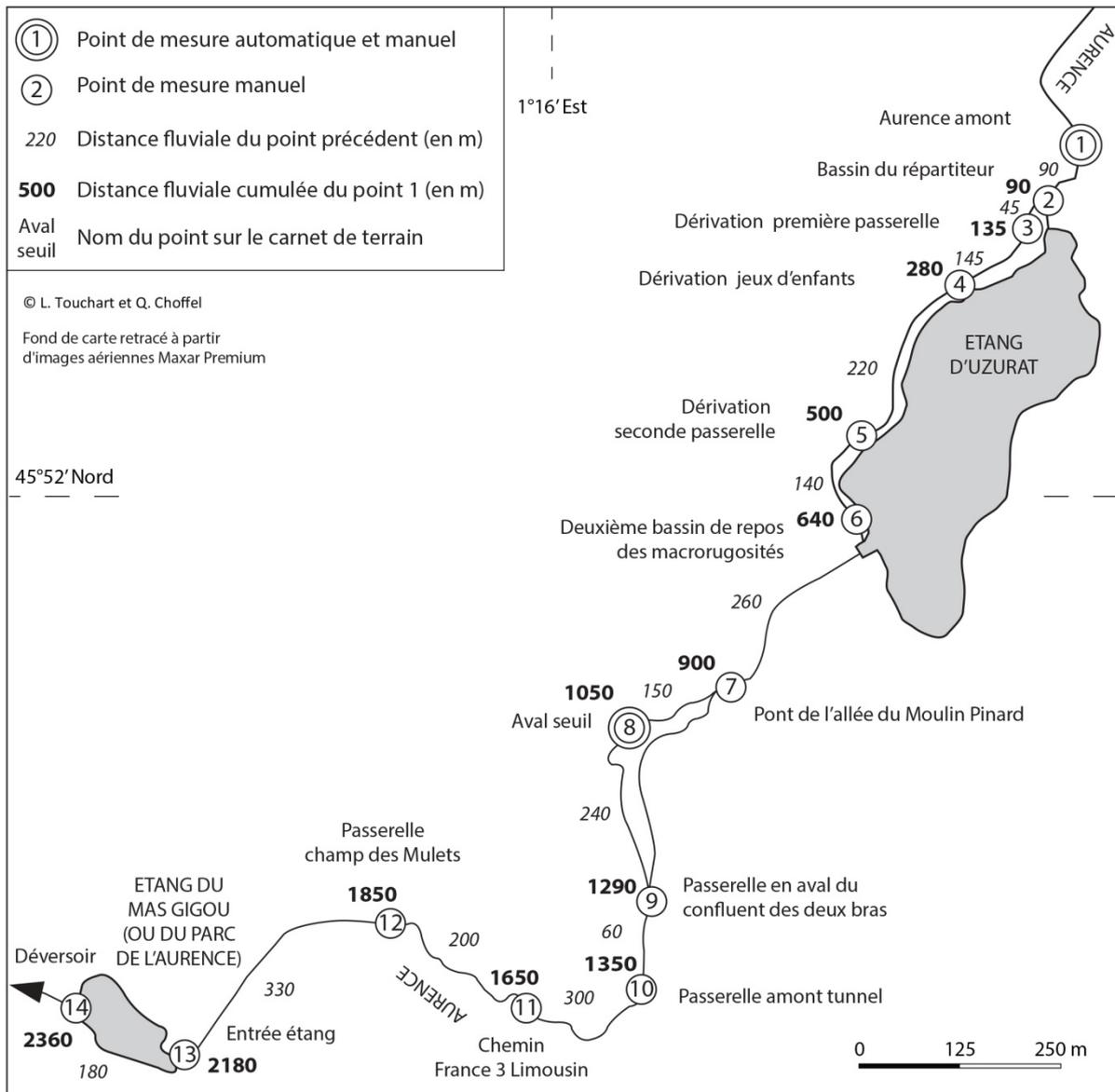


Fig. 4 Localisation des points de mesure de la température de l'eau
Fig. 4 Location of water temperature measurement sites

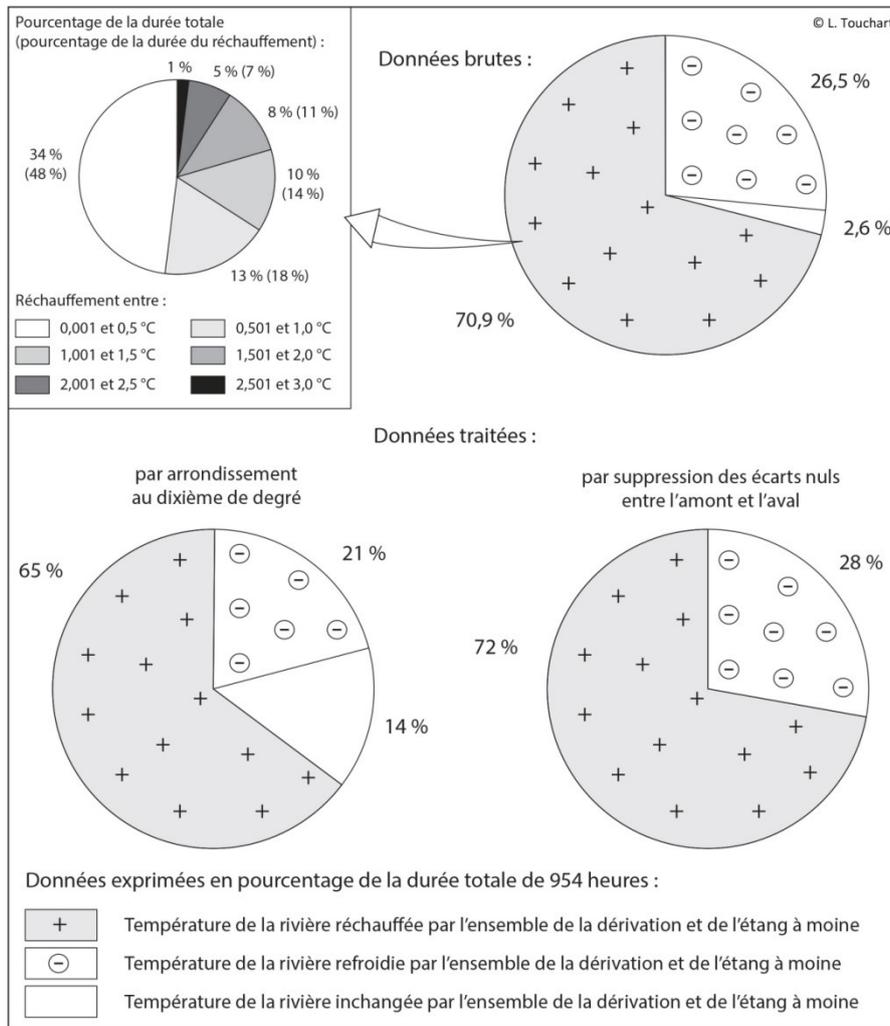


Fig. 5 La part des heures de réchauffement et de refroidissement de l'Aurence par l'étang d'Uzurat de la mi-juillet à la fin août 2019

Fig. 5 Time distribution of heating and cooling of Aurence River by Uzurat pond of from mid-July to the end of August 2019

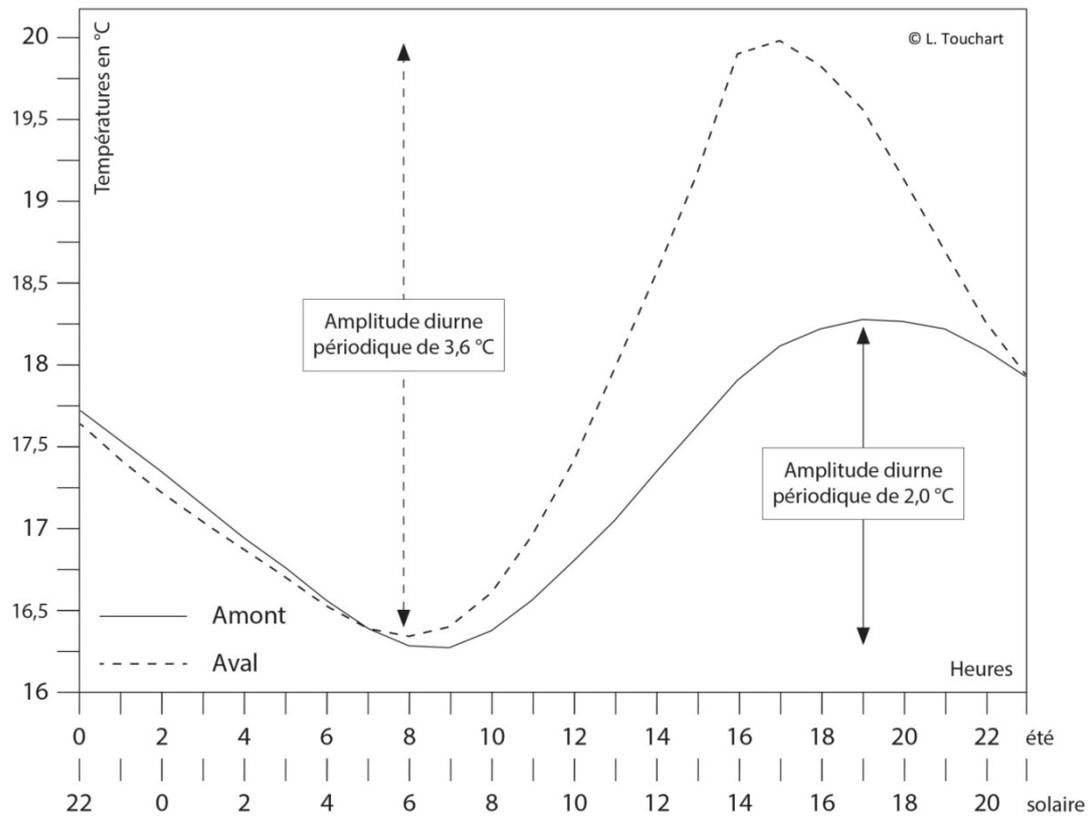


Fig. 6 Cycles diurnes et amplitude thermique de l'Aurence en amont et en aval de l'étang d'Uzurat de la mi-juillet à la fin août 2019

Fig. 6 Diurnal cycles and thermal range of the Aurence River upstream and downstream of the Uzurat pond from mid-July to the end of August 2019

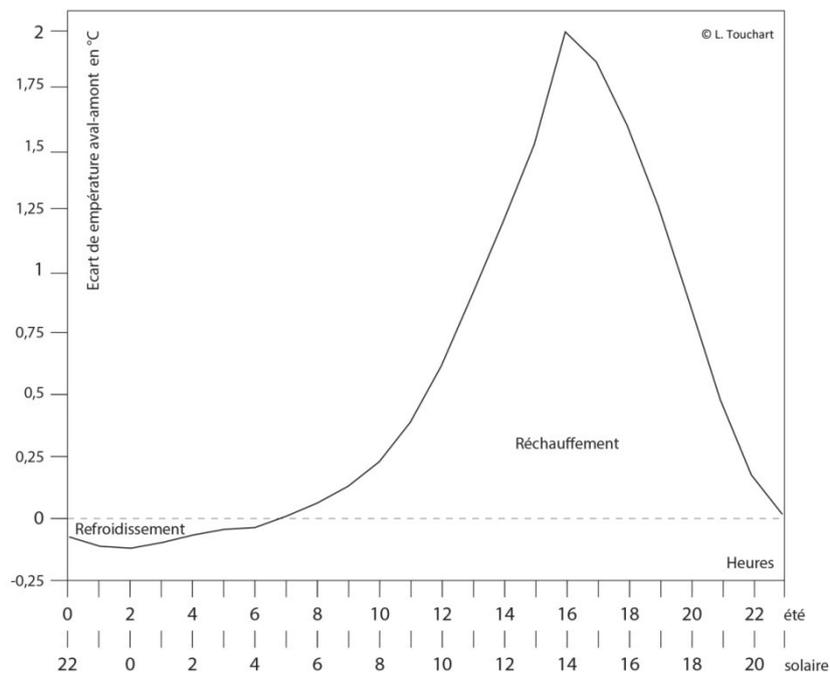


Fig. 7 Cycle diurne de la différence de température de l'Aurence entre l'amont et l'aval de l'étang d'Uzurat de la mi-juillet à la fin août 2019

Fig. 7 Diurnal cycle of the temperature difference in the Aurence River between upstream and downstream of the Uzurat pond from mid-July to the end of August 2019

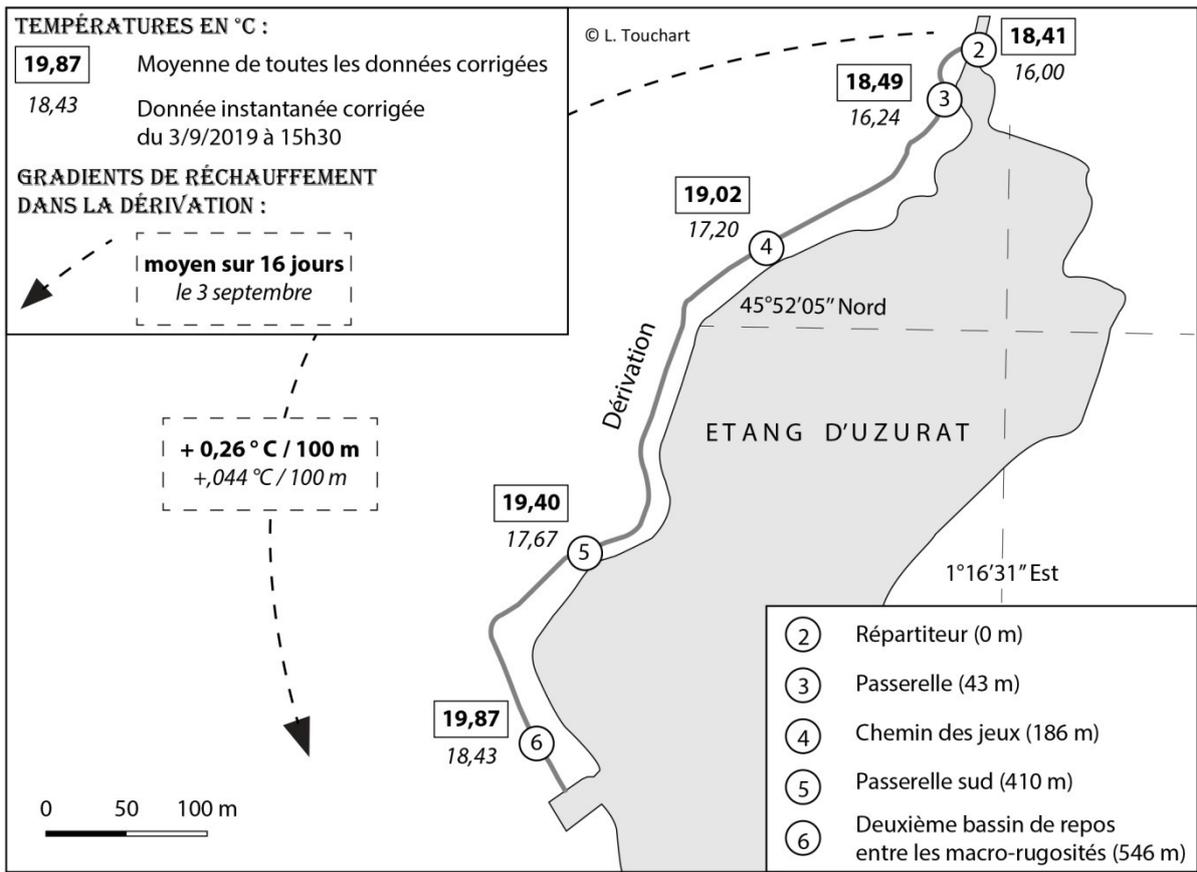


Fig. 8 L'évolution de la température sur le linéaire de la dérivation de l'étang d'Uzurat de fin juin à début septembre 2019

Fig. 8 The change in temperature along the diversion channel of the Uzurat pond from late June to early September 2019

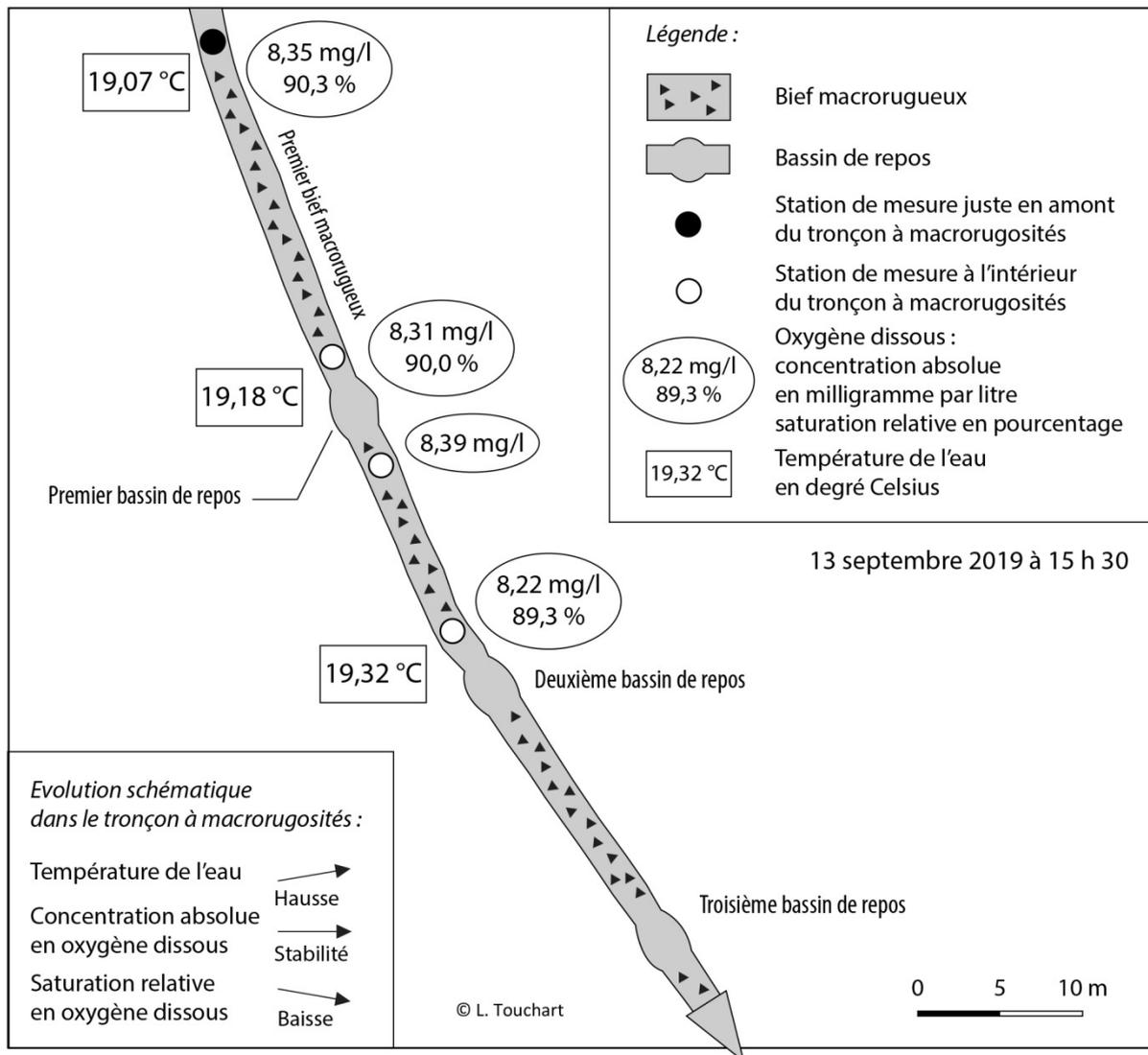


Fig. 9 L'évolution de la température et de l'oxygène sur le linéaire du tronçon à macrorugosités de la dérivation de l'étang d'Uzurat le 13 septembre 2019

Fig. 9 The change in temperature and dissolved oxygen along the macro-roughness section of the Uzurat pond bypass on September 13, 2019

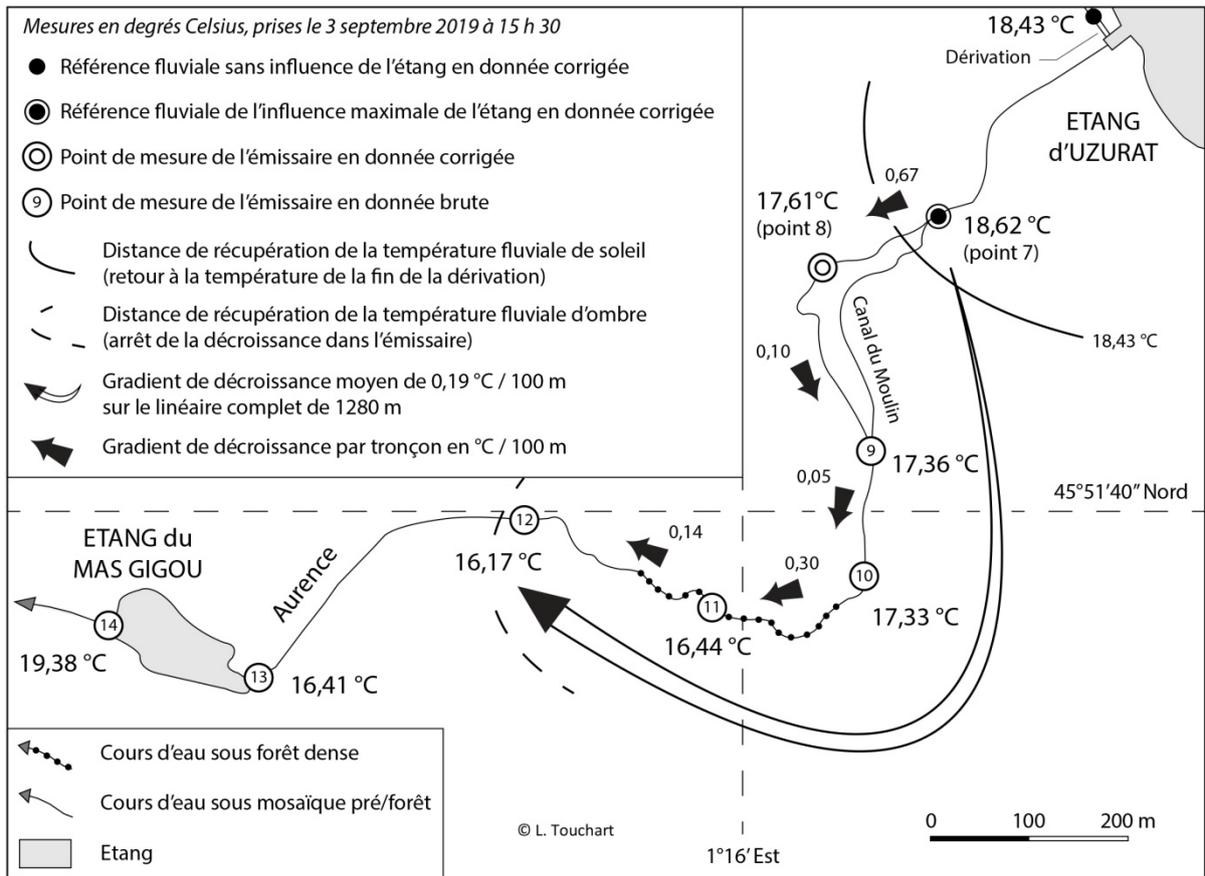


Fig. 10 L'évolution de la température de l'Aurene sur 2 km en aval de l'étang d'Uzurat
Fig. 10 The change in temperature of the Aurene River over 2 km downstream of the Uzurat pond

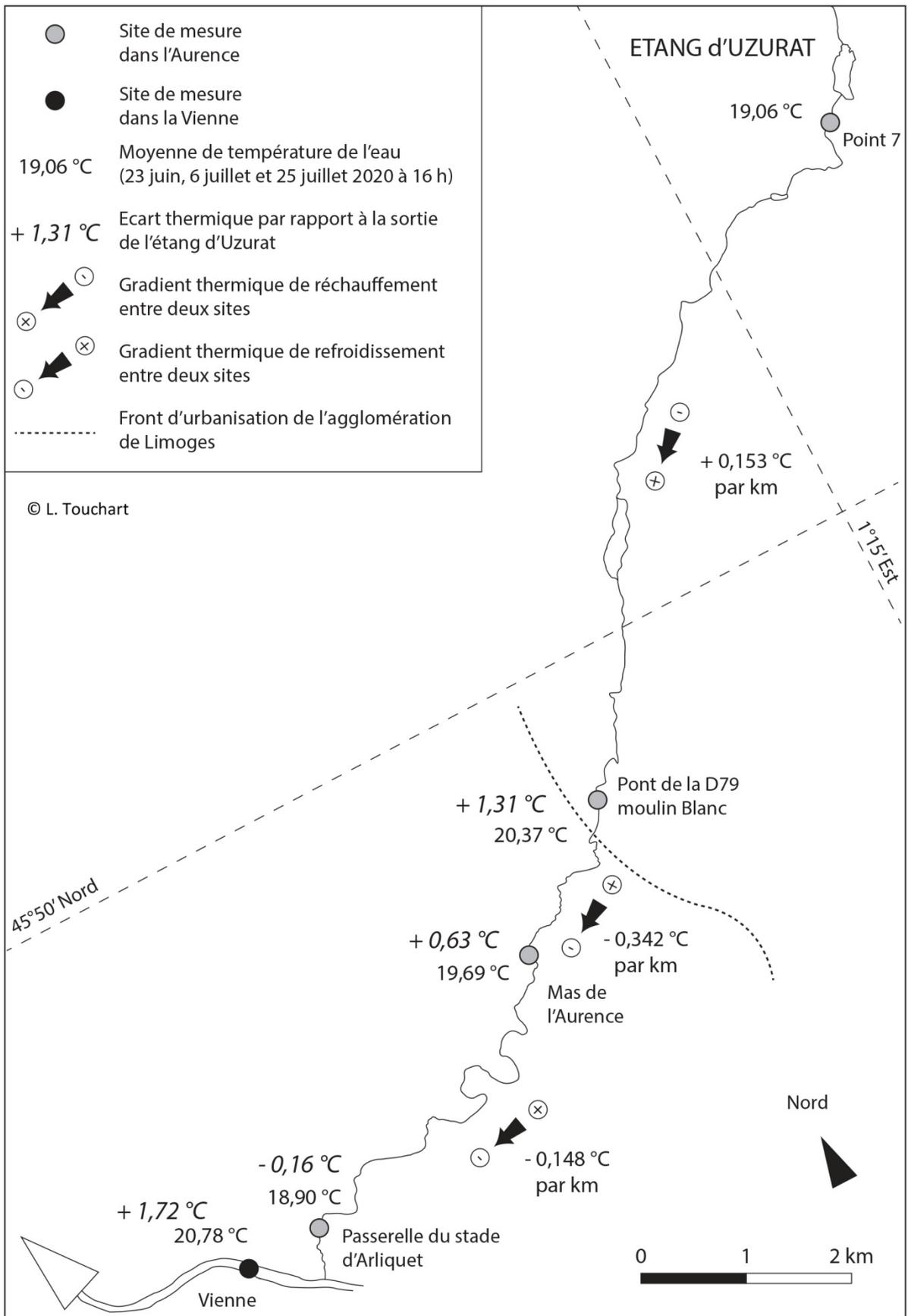
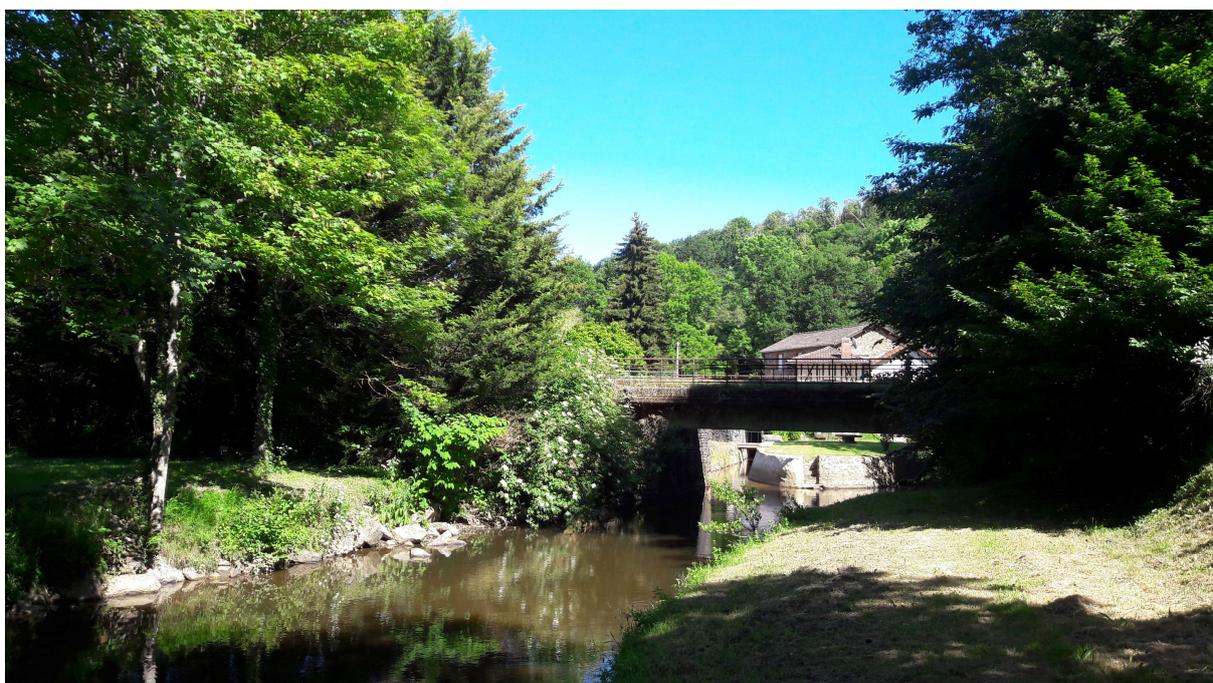


Fig. 11 L'évolution de la température de l'Aurence sur 17 km en aval de l'étang d'Uzurat
Fig. 11 The change in temperature of the Aurene River over 17 km downstream of the Uzurat pond



Couverture de l'article : **L'Aurence, une rivière construite**

Les moulins de Barrat (à gauche) et Boussous (à droite), dont la force motrice permettait jadis de fabriquer la pâte à porcelaine à Aixe-sur-Vienne, font partie des multiples aménagements qui ont depuis longtemps fait de l'Aurence une rivière construite (clichés L. Touchart, 29 mai 2020)



Photo 1 L'étang d'Uzurat et sa nouvelle dérivation

A gauche (au nord-ouest), le chenal de dérivation contourne l'étang d'Uzurat (à droite, soit au sud-est), afin de restaurer la continuité de l'Aurence (cliché L. Touchart, 12 septembre 2019).



Photo 2 Le répartiteur et le blocage du transit sédimentaire

Après un an de fonctionnement, les sédiments accumulés juste en amont du répartiteur barrent le cours de l'Aurence lors des basses eaux de fin d'été et créent un petit bassin limitant l'écoulement (cliché T. Touchart, 2 septembre 2020).



Photo 3 Le secteur à macrorugosités de la dérivation

Le tronçon terminal de la dérivation d'Uzurat a été aménagé en une succession de segments hérissés de blocs et de bassins de repos (cliché C. Boussion, 18 juillet 2019).



Photo 4 Le moine de l'étang d'Uzurat

Le moine de l'étang d'Uzurat est un aménagement qui a une vingtaine d'années. Avec les déversoirs et l'arrivée du tunnel de la dérivation, il forme un ensemble hydraulique complet en sortie du plan d'eau. Pendant l'été 2019, les entrées et sorties d'eau directement de l'étang ont été fortement réduites, afin de privilégier le débit dans le chenal de contournement (cliché L. Touchart, 12 septembre 2019)



Photo 5 Un littoral récemment envahi par la Jussie

Depuis le réaménagement de l'étang d'Uzurat et les travaux au buteur, la Jussie a connu une forte expansion tout autour du plan d'eau (cliché L. Touchart, 12 septembre 2019).



Photo 6 La station hydrométrique du Mas de l'Aurence

La station hydrométrique du Mas de l'Aurence à Isle mesure les débits d'un bassin de 87 km². On voit l'échelle limnimétrique à gauche et le système enregistreur à l'extrémité du pont (cliché L. Touchart, 27 mai 2020).