



HAL
open science

La différenciation des masses d'eau à l'intérieur de l'étang : stratification verticale, zonation horizontale, bilan thermique et centre thermique

Quentin Choffel

► **To cite this version:**

Quentin Choffel. La différenciation des masses d'eau à l'intérieur de l'étang : stratification verticale, zonation horizontale, bilan thermique et centre thermique. Géographie. Université d'Orléans, 2019. Français. NNT : 2019ORLE1167 . tel-02920299

HAL Id: tel-02920299

<https://theses.hal.science/tel-02920299>

Submitted on 24 Aug 2020

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.

**ÉCOLE DOCTORALE SCIENCE DE LA SOCIÉTÉ TERRITOIRE,
ÉCONOMIE, DROIT**

LABORATOIRE CEDETE

THÈSE présentée par :
Quentin CHOFFEL

soutenue le : 17 septembre 2019

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : Géographie - Aménagement – Environnement

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)

THÈSE dirigée par :

Laurent TOUCHART
Pascal BARTOUT

Professeur des Universités, Université d'Orléans
Maître de Conférences HDR, Université d'Orléans

JURY composé de :

Brigitte VINÇON-LEITE

Chargée de Recherches HDR, Ecole des Ponts
ParisTech / Rapporteur

Hervé PIEGAY

Directeur de Recherches, Ecole Nationale
Supérieure de Lyon/ Rapporteur

Jaanus TERASMAA

Directeur de Recherches, Université de Tallinn /
Examineur

Pascal TRINTIGNAC

Ingénieur territorial et conseiller aquacole, SMIDAP /
Examineur

Pierre-Alain DANIS

Chargé de mission, Agence Française pour la
biodiversité / Examineur

*« Certains regardent la vase au fond de l'étang, d'autres contemplent la fleur
de lotus à la surface de l'eau, il s'agit d'un choix »*

(Jonathan Sacks, « *La dignité de la différence- pour éviter le choc des civilisations* », 2004).

Avant-propos

Parce qu'une thèse ressemble à un travail solitaire mais n'est en réalité que le fruit d'un effort collectif, avec ses directeurs, ses collègues, et qui serait insurmontable sans tous les amis et la famille qui nous entourent. Pour ces raisons, je tiens à remercier vivement l'ensemble des personnes qui ont participé ou aidé, de près ou de loin à la réalisation de cette thèse.

Je tiens dans un premier temps à remercier vivement le professeur Laurent TOUCHART pour son dévouement durant ces quatre années. Vos connaissances scientifiques et votre disponibilité ont été inaltérables tout au long de cette thèse. Il faudrait bien plus que de simples lignes pour vous remercier de votre soutien permanent ainsi que pour ces heures passées sur la thèse, sur les projets, l'association et tout le reste, sans oublier vos conseils avisés et la rapidité de vos réponses. Heureusement que les quelques découvertes gastronomiques lors de cette thèse ont permis de compenser l'immense aide que vous avez apportée. Je ne vous remercierai jamais assez d'avoir été un modèle (et pas seulement un modèle évangélique) de pédagogie, de savoir et d'humilité.

Mes remerciements s'adressent également à Pascal BARTOUT, co-directeur infatigable, pour ta grande aide tout au long de ces quatre années et nos échanges enrichissants. Merci de ta confiance accordée à la thèse et de m'avoir donné la possibilité d'intervenir dans la Licence Professionnelle. Ta complicité et complémentarité avec Laurent ont énormément apporté à cette thèse et ta franchise m'a été d'une grande aide. Depuis les débuts, il y a 5 ans sur les bords de la Baltique, tes apports scientifiques et humains m'ont permis d'aboutir à ce travail avec la plus grande sérénité.

Merci à Madame Brigitte VINÇON-LEITE et au Professeur Hervé PIEGAY d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail et d'avoir apporté votre examen critique à ces recherches.

Merci également à Pascal TRINTIGNAC d'avoir accepté de faire partie du jury et pour les discussions lors des courtes rencontres lors de séminaires ou par mail. Mes remerciements s'adressent également à Pierre-Alain DANIS pour son aide depuis le début de la thèse et d'avoir accepté de faire partie du jury. Merci pour le temps accordé à cette thèse, ton apport conséquent dans la modélisation ainsi que pour les échanges par mail ou sur Aix en Provence.

Thank you Jaanus TERASMAA for being a member of this thesis jury and for all the time spent together at Tallinn University or in fieldwork in Kurtna. All your advices were precious !

Broadly speaking, I want to thank all the member of the Institute of Ecology for your hospitality and all the good time we spent together in Estonia, in 2014 and 2017 and 2018. *Suur aitäh* Tiiu for your warm welcome and everything you've done for me during my internship and my PhD. Thanks to Oliver, Tiit, Agnes, Kadri, Egert and Marko for your time in the lab or fieldwork and for sharing some good beers with me. You're all the reason why my time in Estonia was wonderful.

Näeme varsti !

Merci aux personnes sur le terrain qui ont apporté énormément à ce travail par leurs connaissances locales, leur disponibilité et leur gentillesse.

Merci Jean-Pierre PLANE, gestionnaire de l'étang de la Ramade, de m'avoir laissé un peu d'amour pour ton étang, de m'avoir accueilli tant de fois depuis 3 ans, tous les deux mois, et permis de dormir au bord du plus bel étang et avec le plus grand des comforts. Nos discussions m'ont beaucoup aidé pour cette thèse grâce à ton analyse et ta franchise inégalable.

Merci Alban CAIRAULT du SYCOPARC des Vosges du Nord pour ta confiance dans ces deux projets très bien menés par tes soins et pour ton aide précieuse sur le terrain. Ta connaissance des Vosges du Nord m'a permis de grandement améliorer cette étude. Ta gentillesse n'a fait que renforcer le plaisir de passer du temps ensemble sur le terrain et en dehors. Merci également à Monsieur Jacques DUCHÉ de nous avoir permis de continuer l'étude de l'étang de Rilhac et d'avoir tout fait pour que l'on ai les meilleures conditions possibles sur place.

Je tiens à remercier vivement Pierre-Olivier LAUSECKER de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse sans qui cette thèse serait amputée d'une bonne partie, où il manquerait un nombre conséquent de thermomètres. Merci d'avoir cru en mon projet dès le début et de t'être donné tant de mal à le faire naître.

Merci aux collègues du laboratoire CEDETE de l'université d'Orléans sans qui le quotidien tout au long de ces quatre années n'aurait pas été aussi agréable. A ceux présents depuis le début, d'autres partis avant la fin, merci infiniment à Romain, Tarek, Margaux, Cathy, Ousmane, Seydou et les autres pour cette bonne humeur au quotidien, de jour comme de nuit, et ces bons moments qui font parfois oublier les plus durs. Merci Margaux pour tes conseils avisés pendant une année à partager le même bureau, où nos discussions ont su calmer mes doutes sur des aspects pédagogiques et scientifiques.

J'adresse des remerciements plus particulièrement aux compagnons de terrain qui m'ont accompagné sur les innombrables sorties. Tout ça pour se faire de bons restaurants (Herment, si tu m'entends...), quelques balades en bateau, se prendre quelques coups de soleil ou pour attraper froid sous la pluie et la neige. Sans compter les quelques passages par la Pologne ou l'Estonie où la découverte de la nature, des nombreux animaux (lapins, chevreuils, sangliers rencontrés...) et de nouvelles cultures n'ont fait que renforcer nos liens et auront marqué cette thèse. Nos moments sur les lacs gelés, de jour comme de nuit, les interminables kilomètres en voiture, et toutes nos péripéties resteront inoubliables. Pour tout cela, merci Francesco et Simon, ainsi que Mohammad pour toute ton aide et ton expérience lors de nos terrains sur Rilhac.

Merci également à l'ensemble des étudiants de Licence et Master de géographie, ainsi que ceux de Licence Professionnelle de Châteauroux. Nos discussions et partages, en classe ou sur le terrain m'ont apporté énormément et m'ont permis de sans cesse évoluer dans ma pédagogie. Merci plus particulièrement à Céline la meilleure stagiaire jamais eue (certes, la seule, mais bon...) pour sa bonne humeur au quotidien et son goût pour le terrain qui ont rendu les 4 derniers mois de cette thèse plus agréables, au labo comme en Alsace. Tes connaissances naturalistes nous ont permis de nous perfectionner un peu plus à chaque terrain sur les biches et leurs aboiements, les belles orchidées ou encore les petits écureuils...

Merci aux doctorantes des labos voisins qui ont permis un mélange scientifique de haut niveau en traversant le couloir ou une passerelle de temps en temps, dont les discussions en salle de repas ou aux machines à café ne volaient jamais bien haut, mais grâce auxquelles on oubliait tous les soucis de doctorant. Merci Hélène, Camille et Alice pour votre soutien inconditionnel et vos délicates attentions. Les 2 546 cafés pris ensemble, les promenades autour du campus et tous les moments d'échanges extra-universitaires ont été particulièrement agréables. Alice, encore merci pour toute ton aide afin de traduire les articles de la langue de Molière à celle de Shakespeare à de nombreuses reprises. Merci à vous trois, nos moments de partage méritent au moins ces quelques lignes, et ceux à venir n'en seront que plus beaux !

Merci à mes amis de longue date, toujours présents, même si la thèse ne vous a jamais vraiment intéressé (et ça je le comprends...) vous avez été pleins de bons conseils et surtout d'une aide incommensurable par vos paroles, vos rires et les bons moments passés ensemble. Théo, Arthur, Baptiste, Romain, Yoann, Florian, Lyly, Gaétan, Mélissa, Sophie et Cyrielle pour ne citer que vous, merci infiniment, sans vous tout ce travail ne serait pas aussi agréable.

Merci à ma famille sans qui ce travail n'aurait jamais abouti, en particulier à mes parents, Fabienne et Jean-Michel, qui n'ont cessé de m'encourager et dont le soutien fut sans faille. Vous n'avez jamais cessé de croire en moi et de me tirer vers le haut. Merci pour tout, pour nos moments en famille comme ceux passés à relire ce manuscrit interminable. Merci à ma marraine, Agnès, pour ses heures de relecture, que dis-je, de traduction afin de faire en sorte que la thèse soit en français. Merci à ma sœur, Chloé, pour son aide précieuse notamment pour les articles en anglais. Je tiens à remercier chaleureusement mes grands-parents dont la présence et le soutien depuis le début sont des plus importants. A toi papy, qui t'es donné tant de mal à me suivre et à m'aider dans mes études. Je te suis à jamais reconnaissant et j'espère que tu es fier de ce travail accompli...

Enfin, mille merci à ma fiancée Camille pour ses sourires, sa joie et sa bonne humeur au

quotidien. Grâce à toi, chaque jour de ces quatre années de thèse était une merveille. Tu as changé ma vie, me permettant de rester fort à chaque moment difficile en me couvrant de bonheur à chaque instant. Sans toi cette thèse n'aurait pas le même goût, sans toi tout ceci ne serait rien ! Merci pour ces belles années et celles à venir.

Je souhaite pour terminer remercier ma thèse qui m'a offert les meilleurs moments comme les pires. Elle qui m'a fait découvrir des territoires, des lieux magnifiques, des pays, des pauses culinaires fantastiques et m'a offert un amour certain pour le travail sur le terrain. Elle qui m'a aussi fait m'arracher les cheveux, pour le résultat que l'on connaît maintenant, qui m'a fait douter et stresser à de nombreuses reprises. Mais au final, c'est bien elle qui m'offre quatre années inoubliables. Sans cette thèse, je n'aurais jamais rencontré toutes ces personnes merveilleuses et n'aurais jamais vécu une expérience hors du commun. Merci ma thèse, pour tout et pour rien, pour tes malheurs et tes plaisirs.

Sommaire

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)

INTRODUCTION GENERALE 15

PARTIE 1 : L'APPORT DU BILAN THERMIQUE ET DES RECHERCHES LIMNOLOGIQUES DANS LES CONTEXTES REGLEMENTAIRES ET GEOGRAPHIQUES ACTUELS CONCERNANT LES ETANGS..... 25

CHAPITRE 1 : LE BILAN THERMIQUE ET LA TEMPERATURE DE L'EAU, DE LA LIMNOLOGIE LACUSTRE A SON APPLICATION STAGNUSTRE..... 29

- 1.1 LE BILAN THERMIQUE: OUTIL SYNTHETIQUE ET INTEGRATEUR DE L'ANALYSE DE LA TEMPERATURE DES PLANS D'EAU 29
- 1.2 PROPRIETES DE L'EAU ET GEOGRAPHIE DE LA TEMPERATURE : QUELLES PARTICULARITES DES PETITS PLANS D'EAU ? 39
- 1.3 LES PARTICULARITES GEOGRAPHIQUES ET LIMNOLOGIQUES DES ETANGS 48
- 1.4 POURQUOI ETUDIER LES ETANGS EN LIMNOLOGIE ? 60

CHAPITRE 2 : LOCALISATION DES TERRAINS D'ETUDES AU CŒUR DE REGIONS D'ETANGS..... 73

- 2.1 GEOGRAPHIQUE DES ETANGS: UNE PRESENCE MAJEURE DE PETITS PLANS D'EAU DANS LES TETES DE BASSIN 73
- 2.2 LES ETANGS ETUDIES: DES ETANGS FRANÇAIS CARACTERISTIQUES DE LEUR REGION AUX PETITS LACS DES HAUTES LATITUDES EUROPEENNES..... 88

PARTIE II : LE BILAN THERMIQUE STAGNUSTRE, METHODOLOGIE DE CALCUL ET ANALYSE DE TROIS ETANGS..... 121

CHAPITRE 3 : METHODES ET OUTILS DE MESURES DE GEOGRAPHIE LIMNOLOGIQUE 125

- 3.1 INSTRUMENTS DE MESURES THERMIQUE, HYDROLOGIQUE ET METEOROLOGIQUE 125
- 3.1 METHODOLOGIE DE MESURE DU BILAN THERMIQUE STAGNUSTRE 138
- 3.3 QUELS INDICATEURS LIMNIQUES DE LA STRUCTURE DE LA COLONNE D'EAU PEUVENT ETRE UTILISES EN ETANG ? 152

CHAPITRE 4 : LE BILAN THERMIQUE DES PETITS PLANS D'EAU 168

- 4.1 LE BILAN THERMIQUE D'ETANG COMME MODELE DE FONCTIONNEMENT 168
- 4.2 ETUDE COMPAREE DE LA DYNAMIQUE THERMIQUE DE TROIS ETANGS FRANÇAIS A MORPHOLOGIES VARIEES..... 192
- 4.3 Éléments de comparaisons du bilan thermique entre les petits plans d'eau..... 203

PARTIE III : UNE GEOGRAPHIE THERMIQUE DES MASSES D'EAU CONDITIONNEE PAR LES VARIATIONS VERTICALES ET HORIZONTALES DE TEMPERATURE 219

CHAPITRE 5 : LES TERRITOIRES D'ECHANGES ENTRE LE PLAN D'EAU ET SON ENVIRONNEMENT 223

- 5.1 APPROCHE LIMNOCENTREE DE L'ETUDE DU RISQUE THERMIQUE 223
- 5.2 ANALYSE DES ECHANGES CALORIFIQUES ENTRE SYSTEMES HYDROLOGIQUES DANS L'ETUDE CUMULEE DES ETANGS..... 240

CHAPITRE 6 : LA REPRESENTATION THERMIQUE DES MASSES D'EAU EN TROIS DIMENSIONS..... 250

- 6.1 MISE EN PLACE D'UNE METHODOLOGIE DE MESURE DE L'HETEROGENEITE SPATIALE D'ETANGS SELON LEUR MORPHOLIES ET LEUR ENVIRONNEMENT..... 250
- 6.2 UNE GEOGRAPHIE DU FONCTIONNEMENT THERMIQUE DES PLANS D'EAU DEPENDANTE DE LEUR MORPHOLOGIE? 260
- 6.3 L'INFLUENCE DES ECHANGES HYDROLOGIQUES DANS LA ZONATION THERMIQUE 279

PARTIE IV : L'APPORT DE L'ANALYSE SPATIALE ET DU BILAN THERMIQUE DANS L'ETUDE DES ECHANGES CALORIFIQUES ET DANS LA GESTION THERMIQUE DES PLANS D'EAU..... 303

CHAPITRE 7 : LE CENTRE THERMIQUE, NOUVEL OUTIL DE QUANTIFICATION DE L'HETEROGENEITE SPATIALE DES MASSES D'EAU 307

7.1 D'UN BILAN THERMIQUE SPATIALISE A LA CREATION DU CENTRE THERMIQUE 307

7.2 LE CENTRE THERMIQUE, NOUVEL OUTIL D'ANALYSE DE L'EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DU BILAN THERMIQUE D'UN PLAN D'EAU 315

CHAPITRE 8 : UNE APPROCHE GEOLIMNOLOGIQUE DE LA GESTION DES ETANGS..... 330

8.1 LA COMPOSANTE SPATIALE PEUT-ELLE APPORTER DES ELEMENTS DANS LA GESTION DE L'ETANG POUR SA PRESERVATION ET LA REDUCTION DE LEUR INCIDENCE SUR LE MILIEU AVAL RECEPTEUR ? 330

8.2 LA VARIABLE SPATIALE COMME ELEMENT DE DISSOCIATION DES MASSES D'EAU 348

CONCLUSION GENERALE 363

Introduction générale

Dans le haut bassin limousin de la Dordogne, l'étang de la Ramade a été considéré comme responsable, il y a plusieurs années, du réchauffement du lac de barrage de Bort-les-Orgues. Dans le haut bassin mosellan du Rhin, le budget prévu pour construire une dérivation contournant l'étang de Baerenthal n'a cessé de croître pour atteindre plus d'un million d'euros en 2018. Dans le réseau hydrographique des petits plans d'eau de culot de glace constellant la partie estonienne du bassin de la Narva, le suivi de la qualité de l'eau est perturbé par de curieuses anomalies.

Ces trois exemples européens ont comme point commun de concerner de tout petits plans d'eau de tête de bassin, à stratification fragile, ou du moins facilement dérangée, et à entrées latérales, par ruisseaux ou par nappes, de grande importance en proportion de la taille du plan d'eau. Ils posent des problèmes qui ne peuvent être résolus que par une étude précise des masses d'eau, dont le discriminant majeur est la température. Dans un cas, il est nécessaire d'effectuer un changement d'échelle et de comparer le volume calorifique d'un étang avec celui d'un grand lac de barrage. Dans un autre, il convient de faire la part entre la contenance calorifique issue de l'étang et celle du cours d'eau de contournement. Dans un autre, enfin, il s'agit de comprendre comment la masse d'eau provenant de la nappe s'insère, de façon plus ou moins anormale, entre les masses d'eau du petit lac-étang de kettle.

Deux postulats, trop souvent acceptés comme tels, mettent à mal les bonnes pratiques d'aménagement des territoires de têtes de bassin, de ruisseaux, d'étangs, qui forment l'amont de tout le chevelu hydrographique : d'une part assimiler l'étang à un lac tronqué à son seul épilimnion et à sa seule zone littorale (Loup, 1974), d'autre part mesurer la température sans tenir compte du volume d'eau qu'elle caractérise.

Ces approximations traduisent une certaine méconnaissance du fonctionnement de l'étang, trop souvent considéré comme un milieu homogène ou, au contraire, intégré avec les grands réservoirs lorsque l'on étudie leurs impacts (Carlier *et al.*, 2016). L'hétérogénéité thermique de l'étang a rarement été prise en compte et souvent réduite, dans sa composante verticale, à la partie épilimnique ou littorale du lac. L'idée principale réside encore aujourd'hui dans le caractère homotherme de la colonne d'eau des étangs. Le courant de pensée de géographie limnologique contredit cette hypothèse et a démontré des hétérogénéités de température dans la verticalité des étangs (Touchart, 2001, 2007, Folkard *et al.*, 2007), son hétérogénéité horizontale restant peu étudiée. Plus généralement, même

pour des plans d'eau de plus grande taille, l'hétérogénéité horizontale de la température a peu attiré l'attention des limnologues (Wedderburn, 1910, Milon, 1929, Melin, 1939, Abbasi *et al.*, 2016, Soullignac, 2017), peut-être du fait de la faible présence de géographes en limnologie depuis le milieu du 20^{ème} siècle. En étang, l'approche est quasi inexistante, ce milieu étant généralement considéré comme spatialement homotherme, excepté dans sa zone littorale en lien avec la végétation qui s'y développe (Brunaud, 2007, Coates et Folkard, 2009).

Le lien entre l'étang et la société est particulier, différent de celui des lacs, et souffre de certaines contradictions. C'est ainsi qu'il demande une eau chaude pour augmenter la productivité lorsque l'étang est à vocation piscicole, alors que, dans le même temps, les directives et réglementations environnementales exigent une eau fraîche à la sortie du milieu lentique pour favoriser le développement et la vie d'espèces piscicoles de types salmonidés en cours d'eau. Cette incohérence place le plan d'eau de barrage au cœur d'un conflit d'usage et de réglementations, où le propriétaire doit assurer une gestion pour limiter ce risque de pollution thermique à l'aval. Face à ce dilemme, est-il réalisable de limiter l'influence thermique aval tout en préservant une quantité de chaleur conséquente à l'intérieur du plan d'eau ? Ces questions supposent une analyse des contenances de chaleur au sein du plan d'eau non plus uniquement à l'échelle verticale, mais également à l'échelle horizontale en prenant en compte le plan d'eau dans son ensemble volumétrique.

La prise en compte des variations spatiales tant verticales qu'horizontales conduit à regarder l'étang comme une masse d'eau, au sens premier et scientifique du terme, dont l'analyse thermique doit par conséquent se faire en étudiant sa contenance calorifique, elle-même considérée comme la multiplication du volume d'eau par la température (Forel, 1892, Hutchinson, 1957). Le suivi de la contenance calorifique des plans d'eau, de leur évolution à toutes les échelles de temps, y compris en allant jusqu'au pas horaire, et des échanges avec les autres composantes hydrologiques de surface ou souterraine apporte une méthodologie nouvelle. L'analyse des échanges limnocentrée, en plaçant le plan d'eau au cœur des échanges, permet de pallier les manques issus des études considérant le milieu lentique comme une boîte noire. L'analyse calorifique permet d'établir la distinction entre les étangs et les cours d'eau, mais également entre les masses d'eau à l'intérieur de l'étang.

La différenciation des masses d'eau au sein d'un étang est à étudier et cartographier. L'étude des étangs permet d'analyser un plan d'eau à taille humaine dans lequel on peut faire varier les composantes à la fois verticales et horizontales tout en englobant la totalité de la masse d'eau avec une précision suffisante. Ceci est possible grâce à leurs faibles superficie et profondeur. La rapidité et la multiplicité de leurs variations thermiques (Dussart, 1966), soit leur fonctionnement polymictique discontinu (Lewis, 1983), nécessite un suivi à des résolutions spatiales et temporelles fines. L'analyse de la contenance calorifique des différentes masses d'eau permet une typologie des étangs en fonction de leur morphologie et des conditions climatiques.

L'existence de masses d'eau différenciées au sein d'un étang peut être quantifiée de manière analytique en étudiant les variations verticales, horizontales et en tenant compte de la composante temporelle. Pour une analyse synthétique de l'ensemble des échanges de chaleur entre le plan d'eau et l'air, ainsi qu'au sein du plan d'eau dans les composantes verticales et horizontales, les indicateurs lacustres sont-ils suffisants et applicables aux étangs ? L'analyse du bilan thermique et de la stabilité permet-elle la compréhension des échanges spatiaux de température, notamment dans leur zonation ? L'ensemble des paramètres habituels se basant sur une analyse dans la dimension uniquement verticale, il semble nécessaire d'apporter un nouvel indicateur intérateur de la zonation spatiale, en considérant la masse d'eau en trois dimensions et son évolution dans le temps.

Hypothèse :

L'hypothèse de travail principale est celle de l'hétérogénéité de l'étang dans les trois dimensions. Elle pose une structuration des masses d'eau, due aux différences de densité, donc de température, cumulant la stratification verticale et la zonation horizontale, certes selon des échelles de temps plus courtes qu'en lac, mais néanmoins suffisantes pour caractériser le fonctionnement interne de l'étang. L'hypothèse secondaire, insérée dans la première, présuppose que l'efficacité du système de sortie d'eau (déversoir, moine, vanne, etc.) dépend de sa localisation par rapport aux masses d'eau précédemment évoquées et leur évolution spatio-temporelle (au-dessus ou en dessous de la thermocline, dans le bassin où les eaux les plus chaudes sont poussées par le vent et épaissies, ou au contraire chassées et remplacées par des remontées froides, etc.).

Objectifs :

La principale originalité de cette thèse est qu'elle aborde la question des masses d'eau internes à l'étang selon une démarche de géographie limnologique, laquelle tient de la géographie pour fonder son approche sur les quatre dimensions de l'hydrosystème (Roux, 1982, Amoros et Petts, 1993), et de la limnologie pour considérer le plan d'eau, en tant que limnosystème, comme moteur du réseau hydrographique (Touchart et Bartout, 2018). Dans le cadre de cette thèse, de modestes propositions de gestion seront élaborées afin de tenter d'améliorer la qualité et le suivi de la température des milieux lenticques et lotiques qui en découlent.

1) Etudier le bilan thermique des étangs comme un modèle de fonctionnement particulier

Le bilan thermique des lacs a été largement étudié depuis des décennies, alors que son évolution reste peu connue pour les étangs. Le bilan thermique des étangs a un fonctionnement propre qui diffère de celui des lacs, de par leurs faibles profondeur et superficie. L'objectif est d'analyser et de quantifier l'évolution de la contenance calorifique de trois étangs en fonction de leur morphologie et des paramètres climatiques sur plusieurs années. Enfin, dans un besoin de connaissance de la contenance calorifique des petits plans d'eau à une échelle régionale, des tentatives d'extrapolations à partir de quelques plans d'eau seront réalisées à une plus petite échelle.

2) Développer un indicateur afin de mesurer et quantifier la variation spatiale du bilan thermique

Il existe une multitude d'indicateurs de variation spatiale de la température selon la profondeur. En revanche, aucun indicateur ne met en avant les variations horizontales de la température et la capacité du plan d'eau à développer cette hétérogénéité spatiale. Nous proposons ici un nouvel indicateur pouvant répondre à des besoins de connaissances spatiales de la température et de la structure thermique, prenant en compte le bilan thermique du plan d'eau et donc son volume et sa température. Cet indicateur est un outil de compréhension globale mais aussi un apport pour la gestion du plan d'eau et du risque thermique pour le milieu récepteur aval.

3) Comprendre l'hétérogénéité spatiale des masses d'eau en fonction des types d'étangs

Selon la superficie, la morphologie et les facteurs environnementaux, les plans d'eau peuvent connaître des variations spatiales de leur paramètres physico-chimiques. L'objectif est ici d'analyser et de quantifier cette variation sur trois étangs : un grand étang multilobé, un petit étang bénéficiant d'un effet localisé d'ombrage ainsi qu'un étang à temps de rétention des eaux court, dans lequel le cours d'eau peut avoir un effet sur la répartition de température. Ces analyses sont complétées sur trois petits lacs, influencés par les apports souterrains pour deux d'entre eux ou la création d'un canal pour le troisième, tous situés en Estonie. Les hypothèses principales sont la dissociation de masses d'eau, d'une part en fonction des bassins stagnistes et lacustres, chacun d'entre eux pouvant avoir un fonctionnement autonome de la zone centrale dans le cas des plans d'eau multilobés, d'autre part en fonction des facteurs environnants locaux, comme la présence d'arbres riverains, qui peuvent influencer même les plus petits étangs.

4) Proposer des outils basés sur la variation spatiale des paramètres physico-chimiques afin d'améliorer la gestion de l'étang et de limiter le risque thermique dans le milieu aval

La géographie permet d'apporter également quelques réflexions sur les possibilités de gestion des étangs. La majorité des analyses et des propositions actuelles de gestion sont orientées vers l'aspect vertical du plan d'eau concernant la profondeur de la colonne d'eau. Les questions de profondeur de sortie d'eau sont les plus discutées et le seront à nouveau ici. En complément, des hypothèses de gestion seront émises, basées sur l'interprétation de la variation spatiale pouvant apporter une nouveauté et ainsi limiter l'influence thermique aval grâce à des méthodes dites douces.

Structure de la thèse

La première partie du travail reprendra les travaux déjà menés sur les étangs. La première difficulté est de définir et délimiter ces espaces à l'interface entre lac et mare, et

entre plan d'eau et cours d'eau. Par leur petite taille et leur faible profondeur, ces milieux ont été peu étudiés mais sont au cœur d'un contexte physique et social complexe. L'approche des étangs sera celle d'un géographe physicien, plaçant le plan d'eau au cœur des échanges climatiques, hydrologiques et calorifiques mais en se penchant sur les questions environnementales. Les aspects de biologie par l'approche piscicole, de déplacement du plancton ou de températures létales seront abordés. Enfin, l'étude des étangs est indéniablement géographique puisqu'aux aspects physiques se mélangent les besoins sociaux à la source de la création du milieu, et dont les services permettent d'assurer un loisir, un besoin hydrologique à des fins agricoles ou encore un rendement économique. Les problématiques sociales se doivent d'être abordées lorsque l'on étudie ces milieux anthropiques, créés par l'Homme et voués à disparaître naturellement ou par la main de l'Homme. Les terrains d'étude seront également mis en avant selon leur choix de localisation, du rebord ouest du Massif Central à l'extrême ouest de la plateforme russe en passant par le plateau gréseux des Vosges du Nord, plusieurs secteurs différents seront comparés. Chacun étant représentatif d'un type de plan d'eau ou d'une région d'étangs.

La deuxième partie se penchera dans un premier temps sur les questions méthodologiques mises en place pour l'étude, du matériel utilisé aux réflexions de mise en valeur d'indicateurs lacustres traditionnels, puis dans un deuxième temps sur l'analyse d'un modèle de bilan thermique des étangs. Le troisième chapitre est méthodologique, tandis que le quatrième chapitre est dédié aux résultats et aux analyses qui en découlent. Les mesures de plus d'un million de données thermiques en continu nous apportent des résultats sur le bilan thermique et la variation temporelle de trois étangs français et de deux lacs estoniens. L'évolution du bilan thermique des étangs sera à la fois analysée en fonction de leurs particularités morphologiques, notamment liées à la profondeur moyenne, mais elle sera également analysée comme celle d'un modèle d'étang regroupant les connaissances sur les étangs plus ou moins profonds.

La troisième partie traitera de la géographie thermique des masses d'eau. L'étude géographique des plans d'eau par la variation spatiale de la température peut-elle amener à une meilleure connaissance de ces milieux ? Jusqu'à quelle superficie ou sous quelles conditions les étangs sont-ils capables de créer une hétérogénéité thermique ? La composante horizontale, très peu analysée en science limnologique sera ici largement

étudiée, faisant varier les différents facteurs de cette hétérogénéité tels que la présence de tributaires, la force du vent ou encore les échanges par voie souterraine. Les échanges thermiques et calorifiques sont en premier lieu analysés dans le chapitre 5, entre le cours d'eau et l'étang, tandis que l'analyse se concentre sur les échanges internes à la masse d'eau dans le chapitre 6.

Enfin, nous tenterons, à partir de nos résultats, d'apporter des éléments supplémentaires à l'étude et la mesure de la variation spatiale de la contenance calorifique par la création d'un nouvel indicateur : le centre thermique. Ce nouvel indicateur répond aux besoins de connaissances non plus de la colonne d'eau mais de l'ensemble de la masse d'eau. Des éléments de gestion des étangs seront également proposés dans cette dernière partie, en lien avec les connaissances des variations spatiales de température et celle, nouvelle, du centre thermique. Le choix de type de sortie d'eau ou la mise en place de méthodes douces comme l'ombrage à la chaussée seront discutés. Alors que la question de savoir si les étangs nécessitent une gestion ne se pose plus, on peut cependant se demander si la dimension spatiale apporte des solutions d'aménagement. Permet-elle de diminuer le risque thermique dans le cours d'eau aval ? En tout cas, nous nous efforcerons de montrer que le développement d'un nouvel indicateur, le centre thermique, serait susceptible d'apporter des solutions non seulement à la compréhension du milieu mais également à sa gestion.

**Partie 1 : L'apport du bilan thermique et des recherches
limnologiques dans les contextes réglementaires et
géographiques actuels concernant les étangs**

La dissociation des masses d'eau au sein du lac a, dans un premier temps amené à la création du bilan thermique (Forel, 1892) prenant en compte les hétérogénéités verticales de température de la colonne d'eau. Cet indicateur, développé sur les bords du lac Léman, est un outil synthétique de l'ensemble des échanges entre l'atmosphère et le lac, ainsi qu'au sein du lac, préférant les calories à la seule température. Depuis ces premières recherches, le bilan thermique reste un des éléments essentiels à la compréhension des systèmes lacustres et de l'évolution de leurs paramètres physico-chimiques (Potts, 2004, Xing *et al.*, 2012, Kettle *et al.*, 2012, Wang *et al.*, 2014). Cet outil est cependant sous-estimé pour les plans d'eau artificiels et notamment les étangs, alors que c'est justement pour eux qu'il prendrait tout son sens, du fait du déversement des calories dans le cours d'eau aval de manière partielle, ou en totalité lors des vidanges (Touchart, 2016). De fait, un double cadrage est nécessaire. D'une part, en limnologie générale, le fonctionnement, interne au plan d'eau, des alternances entre stratifications et brassages est assez bien connu dans sa composante verticale, ainsi que les échanges externes avec l'atmosphère, mais il manque des études prenant en compte la dimension horizontale. D'autre part, les sciences hydrologiques privilégient soit les lacs naturels, surtout de grande taille, soit les cours d'eau, cependant que les recherches concernant les petits plans d'eau artificiels ne sont pas assez nombreuses. C'est pourquoi la question principale de la première grande partie se trouve être la suivante : dans quelle mesure notre travail peut-il contribuer au renouveau du bilan thermique forélien ? Pour tenter d'y répondre, il est indispensable de développer notre pensée dans deux directions, qui formeront les deux chapitres de cette partie.

Il s'agira d'abord, dans un premier chapitre, de résumer les connaissances actuelles concernant le bilan thermique, dans le sens de son intérêt pour une démarche intégratrice, en faisant ressortir ce qu'il apporte de plus que la simple étude des températures de l'eau. Puisque l'approche sera géographique, elle s'attachera à montrer que, dans les recherches actuelles, la composante horizontale n'est pas assez prise en compte, ni dans la cartographie des températures, ni dans le calcul du bilan thermique. Cela conduira logiquement à souligner combien ce besoin de spatialisation se fait encore plus ressentir dans le cas des petits plans d'eau artificiels de tête de bassin que sont les étangs.

Il existe pourtant des centaines de milliers d'étangs en France métropolitaine (Bartout & Touchart, 2013), répartis en régions d'étangs pour la plupart, telles que la Dombes, la Brenne,

la Sologne, pour les plus connues. Ces régions ont des particularités morphologiques, géologiques et socio-économiques propres, mais des similarités existent dans la localisation des étangs en tête de bassin et leur forme typique de plans d'eau artificiels.

Il s'agira ensuite, dans un deuxième chapitre, de justifier de la représentativité des trois étangs qui ont été sélectionnés, au sein de régions à forte densité de petits plans d'eau, l'un sur le plateau de Millevaches, l'autre en Haut-Limousin, l'autre enfin dans le Pays de Bitche, au cœur des Vosges du Nord. Nous mettrons en avant la morphologie des plans d'eau comme étant le principal critère du choix des terrains. Pour ne négliger aucun type de représentativité, l'échantillon sera constitué par un grand étang multilobé, un très petit étang profond, ainsi qu'un troisième, dont la morphologie simple et l'assez grande taille feront l'intermédiaire entre les deux premiers. Nous discuterons enfin les autres critères, secondaires, de distinction entre ces trois étangs, soit leur localisation géographique, leur lien avec le réseau hydrographique, ainsi que les conflits environnementaux et politiques qu'ils suscitent dans le cadre de la continuité écologique et de l'impact thermique des milieux stagnants barrant un cours d'eau.

Chapitre 1 : Le bilan thermique et la température de l'eau, de la limnologie lacustre à son application stagnustre

1.1 Le bilan thermique: outil synthétique et intégrateur de l'analyse de la température des plans d'eau

La Limnologie est née de la volonté du biologiste suisse F.A Forel d'étudier la « géographie des eaux des lacs ». C'est au bord du Léman qu'est apparu le terme de limnologie (Forel, 1892) ainsi que les prémisses d'études des eaux des lacs, dès le 18^{ème} siècle avec H.B de Saussure (1740-1799) qui fut le premier à voir un réel intérêt à travailler sur la température de l'eau des lacs, à la fin du 18^{ème} siècle (1779¹). Ces auteurs vont montrer leur intérêt pour la géographie, valorisant la description du milieu, sa spatialisation et le fait d'étudier les relations entre les éléments, plutôt que les éléments eux-mêmes (Forel, 1892). La géographie est la science la plus adaptée à la limnologie, d'après son inventeur, dans un esprit de synthèse et de prise en compte des différences d'échelles à la fois spatiales et temporelles.

1.1.1 Contexte historique de calcul du bilan thermique lacustre

1.1.1.1 La naissance du bilan thermique au 19^{ème} siècle

Le terme de bilan thermique a été construit par l'inventeur de la limnologie, le suisse François-Alphonse Forel en 1880. Il est décrit par l'auteur comme la somme algébrique des facteurs amenant et enlevant des calories au plan d'eau. Cette dernière étant définie comme la quantité de chaleur nécessaire pour élever 1g d'eau de 1°C. Le bilan thermique est le nombre de calories contenues dans le lac au minimum hivernal soustrait au nombre de calories au maximum estival de la même année (Forel, 1895, cité par Touchart, 2016.). Cette définition sera reprise par différents chercheurs, puis transformée en « *bilan thermique annuel* » (« *annual heat budget* », Hutchinson, 1957). Son calcul repose sur la multiplication du volume de chaque strate par sa température respective. Les mesures de température de Forel ont été effectuées tous les dix mètres de profondeur, jusqu'au fond, sur le lac Léman.

¹ cité par Touchart, 2002

La température choisie fut d'abord celle de fin de section, puis la température moyenne sera préférée. Le terme a été largement repris, traduit en allemand par W. Halfass (1905, 1923) en *Wärmebilanz*, et par Birge & Juday (1914) en anglais sous l'appellation de *heat budget*. L'année suivante, Birge (1915) consacre un article de cinquante pages entièrement dédié au bilan thermique des lacs européens et américains, établissant les premières comparaisons entre différents lacs selon leur position géographique et leur morphologie bien que les mesures ne soient pas prises simultanément (Wojeikoff, 1902). Le bilan thermique brut d'un plan d'eau, alors mesuré en calories, est divisé par la superficie totale. Le résultat s'exprime en cal/cm^2 permettant la comparaison entre plusieurs plans d'eau (Wojeikoff, 1902, Birge, 1915, Hutchinson, 1957, Gorham, 1964, Allot, 1986).

L'analyse du bilan thermique, à partir des années 1950, a été séparé en deux branches : l'analyse synthétique et analytique (Touchart, 2016). La première prend son origine dans la méthode développée par Forel (1892), considérant le bilan thermique comme la somme calorifique totale du plan d'eau. Cette approche est synthétique et géographique (Figure 1). Synthétique car elle considère le bilan thermique comme un but, celui de quantifier la contenance calorifique du plan d'eau, soit la somme algébrique de l'ensemble des facteurs amenant ou enlevant des calories à la colonne d'eau. Elle est éminemment géographique par son approche liée à la morphologie du plan d'eau et sa localisation géographique. Elle prend en compte l'ensemble des échanges, à la fois météorologiques et hydrologiques.

La méthode analytique favorise l'étude séparée de chaque facteur du bilan thermique. Son analyse se concentre sur les flux énergétiques à la surface du plan d'eau, émettant comme hypothèse que l'ensemble de la chaleur de la colonne d'eau provient de la surface. Cette méthodologie se rapproche de la climatologie, se limitant parfois à l'étude des flux entre l'atmosphère et la surface du plan d'eau.

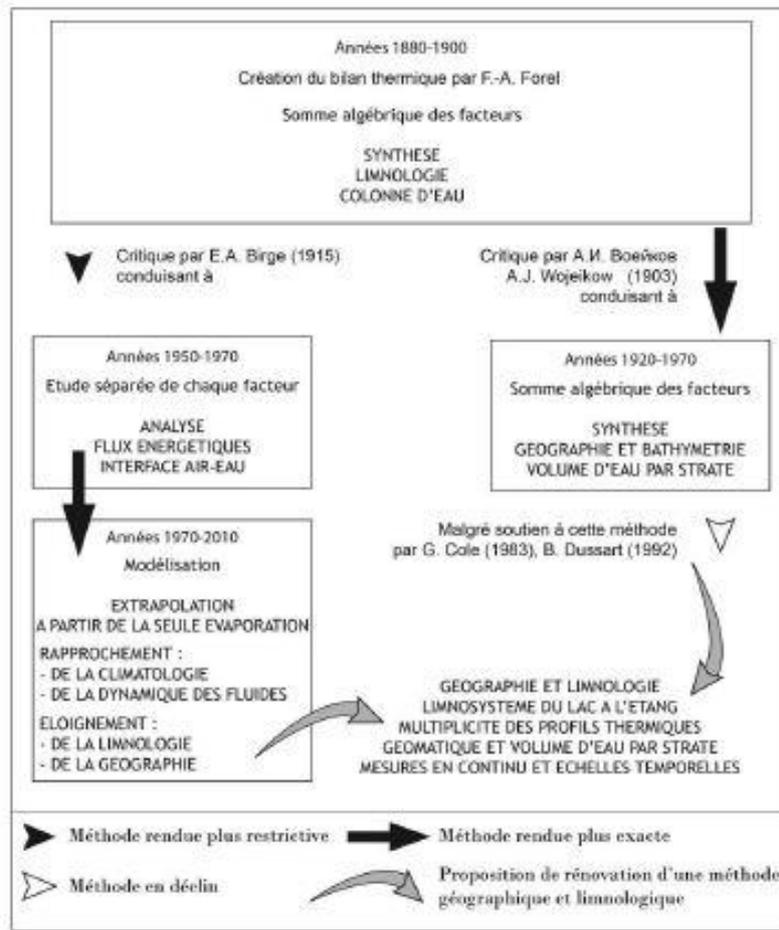


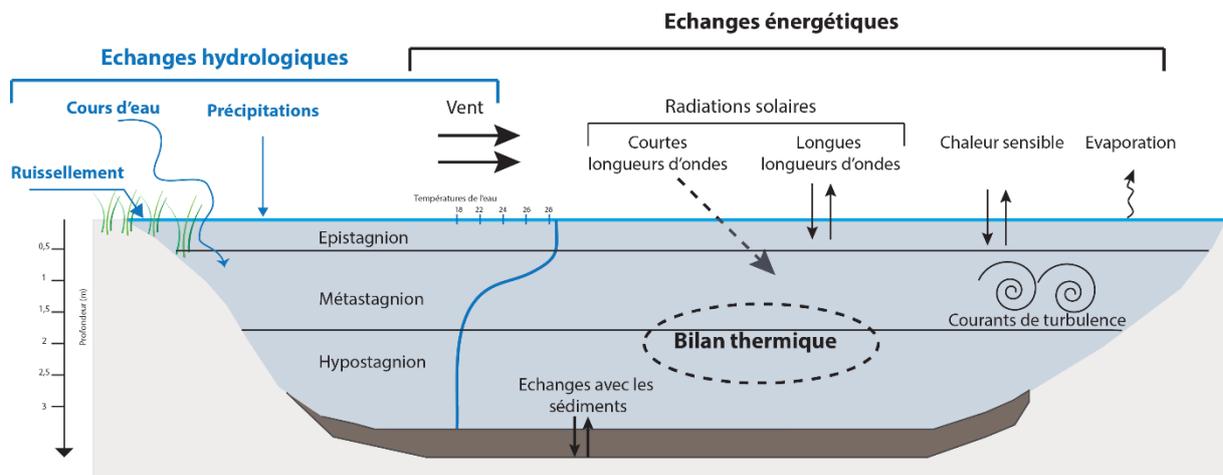
Figure 1: Organisation de l'évolution épistémologique du bilan thermique des plans d'eau (Touchart, 2016)

Notre étude s'insère dans une vision synthétique du bilan thermique intégratrice de l'ensemble des facteurs externes et internes amenant ou enlevant des calories à la masse d'eau. Cette méthodologie fait intervenir les variations verticales et horizontales de la température des strates des masses d'eau. Le changement d'échelle, du local au global, permet un aperçu complet des échanges calorifiques de la masse d'eau et du territoire de l'eau à l'aval. Cette méthodologie s'appuie sur une technique de calcul traditionnel des calories de la colonne d'eau, étendue ici à l'ensemble du plan d'eau par l'apport du zonage thermique.

1.1.1.2 Un bilan thermique lacustre dominé par les échanges atmosphériques

L'ensemble des échanges aux interfaces entre la masse d'eau et son environnement sont traduits par un apport ou par une perte calorifique du plan d'eau. Le bilan thermique est en ce sens synthétique et géographique. Chaque plan d'eau répond d'une manière différente aux forçages climatiques, selon son volume et sa profondeur. Les différents échanges thermiques sont constitués (Figure 2) :

1. Des échanges de chaleur à la limite entre l'air et l'eau, que ce soit les bilans de chaleur latente ou sensible
2. Des échanges de chaleur à la limite eau/sédiment, d'autant plus importants que le plan d'eau est peu profond
3. Des échanges avec les tributaires et émissaires, ainsi que ceux avec la nappe phréatique. L'influence des échanges avec les cours d'eau entrant et sortant est une composante forte dans l'étude des lacs de barrage, et prennent une part également importante pour les étangs, lié aux faibles volumes d'eau.



Q. Choffel, d'après Talling, 2002, modifié et adapté. 2017

Figure 2: Schéma des échanges calorifiques du bilan thermique en étang

Les échanges à l'interface entre l'air et l'eau sont les plus importants dans le bilan calorifique d'un plan d'eau. La radiation solaire est le facteur externe amenant le plus de calories. Les échanges avec l'atmosphère sont concentrés à la surface du plan d'eau.

Le bilan radiatif est de loin le facteur amenant le plus de calories au plan d'eau. Il dépend des conditions atmosphériques et varie dans le temps et l'espace. En fonction de la latitude ou de l'altitude du plan d'eau, celui-ci va emmagasiner plus ou moins d'énergie par rayonnement solaire. La quasi-totalité du rayonnement solaire, après absorption par l'atmosphère et réflexion à la surface du lac, pénètre dans la colonne d'eau. Ce sont les courtes longueurs d'ondes qui pénètrent principalement dans le plan d'eau, dont plus de la moitié est absorbée dès le premier mètre de profondeur. L'absorption des rayonnements solaires dépend de la charge en suspension et des substances dissoutes (Ragotzkie, 1978, Wetzel, 1983). Plus une eau est chargée en matière en suspension, avec une forte productivité, sa couleur tendant vers le vert ou le marron, plus la transparence sera réduite et donc l'absorption de la radiation limitée aux premiers centimètres (Touchart, 2002).

Dans ce même bilan radiatif, les grandes longueurs d'ondes sont synonymes de gain et de perte calorifique (Touchart, 2002). Le rayonnement de l'atmosphère, de la végétation et du sol entraîne un gain calorifique pour le lac, au contraire du rayonnement du lac vers son environnement. La perte calorifique du corps émettant est proportionnelle à sa température. Les gains calorifiques du plan d'eau sont inversement proportionnels à la taille de l'entité hydrologique. Plus un plan d'eau est petit, plus la différence entre le gain et la perte calorifique par rayonnement de grandes longueurs d'onde est importante. Le fait est lié à la plus grande proportion de zone littorale pour les petits plans d'eau.

Le bilan de chaleur sensible s'effectue à l'interface entre l'eau et l'air. Les deux éléments se réchauffent ou se refroidissent mutuellement, en fonction de leur température respective. Du fait de la chaleur spécifique de l'eau très élevée, il est plus facile de réchauffer un volume d'air que d'eau. Lorsque l'eau chauffe l'air, celui-ci s'élève et est remplacé par de l'air plus froid qui poursuit le cycle (Touchart, 2002). Lorsque c'est l'air qui réchauffe l'eau, c'est-à-dire lorsqu'il y a un gain calorifique pour le plan d'eau, seuls les premiers centimètres de profondeur sont affectés. Par les principes de densité, les molécules d'eau se réchauffant, ces dernières sont moins denses et restent à la surface. Les échanges avec les eaux plus profondes sont limités. Seul un forçage externe peut amener des calories dans les profondeurs du plan d'eau. Le bilan de chaleur sensible est peu significatif en lac, affectant seulement la surface du plan d'eau (Goldman & Horne, 1983). En étang, du fait de la faible

superficie, l'ensemble de la colonne d'eau peut être affecté et le bilan de chaleur sensible devient un facteur important dans l'équation du bilan thermique (Touchart, 2016).

Le bilan de chaleur latente est la quantité d'énergie nécessaire au changement d'état d'un corps. L'évaporation est la perte principale de calories à la surface du plan d'eau. Le passage de l'eau de l'état solide à l'état gazeux exige un apport calorifique, soit environ 590 calories par gramme (Touchart, 2002). L'évaporation dépend de trois caractéristiques principales, regroupées dans les lois de Dalton, Jeffreys et Stefan (Péguy, 1970). La première, la loi de Dalton, concerne la variation de pression et d'humidité de l'air. L'effet de l'altitude sur le lac entraîne une augmentation de l'évaporation à la surface de ce dernier. Il est également énoncé que plus l'air au-dessus de l'eau a une humidité relative faible, plus l'évaporation augmente. La loi de Jeffreys concerne le lien entre vitesse du vent et évaporation. Plus un vent est élevé, plus le pouvoir évaporant de la surface en eau est fort. En effet, l'air au-dessus du lac se chargeant en humidité, si cet air est immobile, l'humidité relative va être saturée et l'évaporation du lac sera stoppée. Le déplacement de l'air permet donc de faire fonctionner le processus de l'évaporation, celle-ci croissant en fonction de la vitesse du vent. Cependant, l'augmentation est limitée à un certain seuil de vitesse au-delà duquel l'augmentation du vent n'entraîne plus une augmentation de l'évaporation (Cosandey & Robinson, 2000). Enfin, la dernière loi, celle de Stefan, est de grande importance dans une étude de géographie limnologique. Selon cette loi, l'évaporation dépend de la taille du plan d'eau. Cette loi est proche de la seconde dans l'idée où un air en mouvement au-dessus d'un étang n'a pas le temps de se saturer en eau qu'il est déjà en dehors de celui-ci. Tandis que pour les grands lacs cette masse d'eau saturée peut traverser une grande partie du lac et donc ne provoquer aucune évaporation du fait de sa saturation. Dans ce cas, l'évaporation est susceptible d'être plus importante pour un petit plan d'eau, au contraire des grands lacs. Le bilan de chaleur est généralement négatif pour la plupart des lacs, et ce, principalement lors de la période estivale.

L'évaporation des étangs a longtemps posé de nombreuses questions, par manque de données et mesures sur ces petits plans d'eau particuliers. La thèse de M. Al Domany (2017), après deux années de mesures, a permis de quantifier cette évaporation à partir d'une nouvelle formule, nommée formule *d'Al Domany*. Parmi les étangs, il a été relevé que les étangs les plus profonds, par présence d'une stratification thermique temporaire limitant les

échanges entre la surface et les couches profondes, ont une évaporation estivale plus faible que les petits étangs (Al Domany, 2017).

A l'interface entre l'eau et le sédiment, des échanges thermiques peuvent opérer, principalement pour les lacs peu profonds. Les sédiments absorbent une quantité d'énergie durant la période estivale. La restitution des calories peut avoir lieu lors de l'hiver, là où la température de l'eau est refroidie (Wetzel, 1983). L'absorption de chaleur par le sédiment dépend de sa localisation, au large ou sur le littoral (Likens & Johnson, 1969), de sa composition chimique (Reif, 1969) ainsi que de sa couleur (Touchart, 2002, p.122). Le bilan calorifique du sédiment reste difficile à calculer et est considéré ici comme une composante secondaire du bilan thermique d'un plan d'eau.

1.1.1.3 Les échanges secondaires au bilan thermique

Il existe des plans d'eau situés sur un réseau hydrographique ou influencés par des échanges avec la nappe souterraine. Plus le rapport entre le débit entrant et le volume du plan d'eau est élevé, plus l'action du tributaire va s'avérer importante. C'est souvent le cas pour les lacs de barrage situés sur de grands cours d'eau ou sur les étangs, situés sur de petits cours d'eau mais dont le volume reste relativement faible. L'arrivée d'un cours d'eau entraîne une plongée des eaux dans la strate lacustre correspondant à sa densité. Ce phénomène, appelé bataillière dans le Léman, a longtemps fasciné scientifiques et littéraires dont Jean-Jacques Rousseau (Touchart, 2013). Dans le bilan calorifique, le tributaire apporte des calories au plan d'eau, tandis que l'émissaire lui en enlève. Dans la grande majorité des cas, le bilan hydrologique du plan d'eau est négatif, l'émissaire enlevant plus de calories au plan d'eau que n'en apportent les tributaires (Touchart, 2002, 2016). A des échelles temporelles plus fines, le plan d'eau peut avoir un bilan calorifique hydrologique positif lors de la période hivernale. Le plan d'eau, alors en stratification inverse, déverse des eaux de surface refroidies, de température inférieure à 4°C. Les tributaires quant à eux n'ont pas eu le temps de se refroidir à une température inférieure et vont donc apporter plus de calories que le plan d'eau n'en rejette. Elle reste cependant une part faible du bilan thermique lacustre. Les plans d'eau endoréiques, sans la présence d'un émissaire, ou encore les lacs de barrage par soutirage d'eau de fond plus froide et constante constituent des exceptions de bilan calorifique hydrologique annuel positif. Des lacs naturels peuvent être influencés par la présence d'une nappe souterraine apportant une eau à faible variation de température

pouvant refroidir les couches profondes en période estivale et réchauffer la masse d'eau l'hiver si celle-ci est en stratification inverse.

Les apports et prélèvements de calories par les tributaires et émissaires ou par l'influence d'une masse d'eau souterraine sont rarement pris en compte dans les calculs du bilan thermique lacustre (Hutchinson, 1957, Ragotzkie, 1978, Wetzel, 1983). Leur intérêt a longtemps été limité car les études se sont portées sur les lacs naturels, dont les échanges avec les cours d'eau occupent proportionnellement une part faible dans le bilan thermique. L'étude des étangs apporte ce besoin de dimension géographique et d'intégration d'une approche systémique. Ces petits plans d'eau sont plus fortement soumis à leur réseau hydrologique dont une part importante constitue leur bilan thermique. Leur petite taille et leur évolution rapide permet d'étudier plus en détails les différents éléments du bilan thermique.

1.1.2 Le fonctionnement thermique des plans d'eau, une analyse basée sur les lacs

Le fonctionnement thermique du lac a été largement documenté depuis les premières études au 18^{ème} siècle (De Saussure, 1779). Il est décrit comme une pièce d'eau à évolution lente (Dussart, 1966), caractérisée par des dynamiques thermiques saisonnières (Forel, 1892) et dominée par la convection forcée (Goldman & Horne, 1983). Le bilan thermique varie en fonction du volume de la masse d'eau (Gorham, 1964), de sa micticité (Forel, 1892, Birge, 1915) et de la localisation géographique (Birge, 1915, Hutchinson, 1957). Les apports calorifiques annuels sont largement influencés par la radiation solaire directe, et les pertes par évaporation (Goldman & Horne, 1983, Ragotzkie, 1976, Hutchinson, 1957). Pour les lacs, appelés dimictiques ou monomictiques (Lewis, 1983), l'évolution du bilan thermique est saisonnière, caractérisée par une ou deux périodes de brassage, séparant la stratification estivale de celle hivernale pour les lacs dimictiques, se limitant à la stratification estivale pour les lacs monomictiques.

Stratification thermique

Le rayonnement solaire à courte longueur d'onde pénètre dans la colonne d'eau et réchauffe la colonne d'eau lacustre. L'intensité du rayonnement décroît en fonction de la profondeur, entraînant un réchauffement plus fort de la partie supérieure du lac. Par

variation de densité, le réchauffement de la partie supérieure va stabiliser la colonne d'eau. Lorsque l'eau se réchauffe, celle-ci diminue en densité, au-dessus de la densité maximale de l'eau (soit 4°C). La faible densité de la partie supérieure réchauffée entraîne une stratification de la masse d'eau, soit un écart de température entre la surface et le fond (Figure 3).

Dans les lacs, la profondeur est suffisante pour lutter contre la destruction de la stratification par le forçage externe durant plusieurs mois de l'année (Hutchinson, 1957, Wetzel, 1983, Goldman & Horne, 1983, Touchart, 2001) durant la période chaude. Ces plans d'eau sont brassés une (monomictique) à deux fois (dimictique) par an (Hutchinson, 1957, Lewis, 1983). Les plans d'eau les moins profonds, dont les étangs, peuvent subir plusieurs brassages au cours de l'année. Ils sont caractérisés par une polymicticité appelée continue lorsque le brassage est journalier, discontinue lorsqu'il dépasse la période diurne et peut s'étendre sur plusieurs jours (Lewis, 1983). Les étangs font partie de ces plans d'eau polymictiques discontinus.

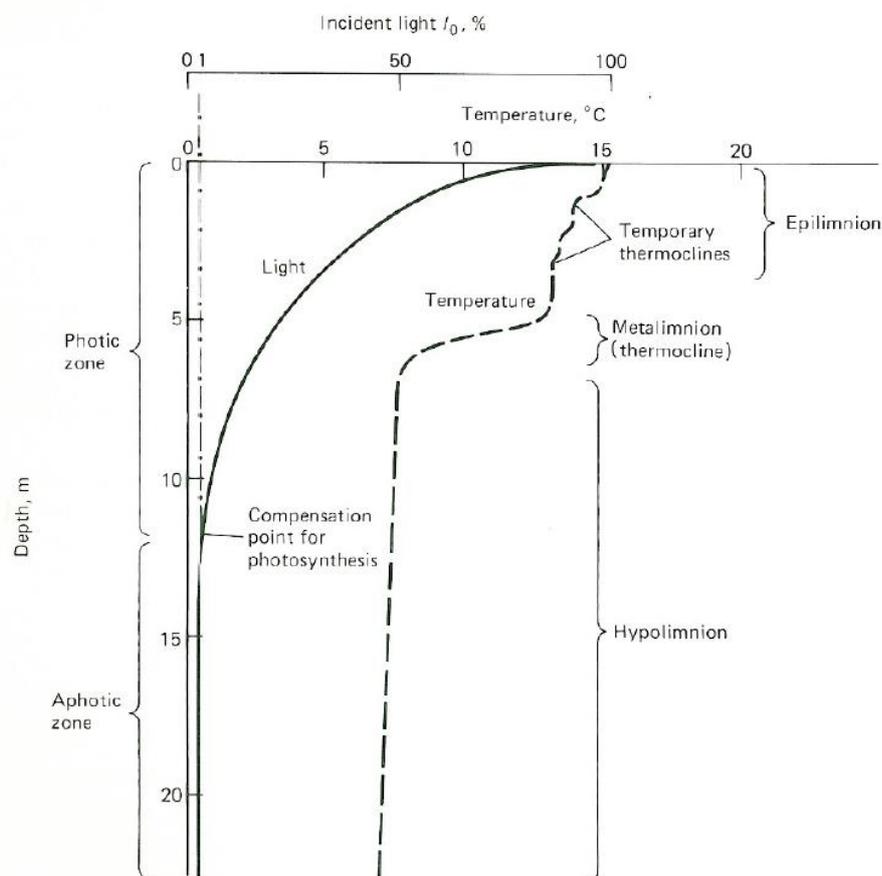


Figure 3: Structure thermique et optique d'un lac (Goldman et Horne, 1983)

Sous nos latitudes, dès le printemps, le lac se stratifie progressivement, atteignant des valeurs de stabilité élevées (4 à 10 000 w/m², Hutchinson, 1957), jusqu'au brassage automnal. La course du vent joue un rôle majeur dans le bilan thermique du lac. Un fetch élevé allonge la profondeur de la thermocline, augmentant le volume de la partie épilimnique et le métalimnion du lac, au détriment de l'hypolimnion. Les calories se dispersent vers le fond et permettent un stockage plus important et une augmentation du bilan thermique. La convection libre, par échange calorifique entre les masses d'eau, est beaucoup plus lente (Touchart, 2002) et représente une part très faible du bilan thermique. La partie hypolimnique du lac ne bénéficie des caractéristiques physico-chimiques de la surface que lors de la période de brassage complet. Lors de la stratification thermique estivale, les échanges thermiques et gazeux sont très limités entre la surface et les parties inférieures. L'oxygène pourvu par les échanges atmosphériques à la surface de l'étang, n'atteint pas les couches profondes qui deviennent anoxiques pendant les quelques mois de stratification.

Le bilan thermique lacustre est caractérisé par une structure tri-couche marquée par des écarts thermiques importants. Les couches épilimniques, métalimniques et hypolimniques sont facilement dissociables et stables durant la période estivale. Pour les plans d'eau polymictiques, l'évolution rapide et la faible stabilité entraînent des complications et méritent une toute autre attention. Ces petits plans d'eau peu profonds ont des particularités de fonctionnement encore peu développées (Touchart, 2002, Folkard *et al.*, 2011) et méritent une attention par leur particularisme stagnustre les dissociant du fonctionnement lacustre. Les prochains chapitres de cette thèse vont tenter de décrire en détail le fonctionnement thermique des étangs, dont la particularité nécessite une dissociation de celui des lacs

1.2 Propriétés de l'eau et géographie de la température : quelles particularités des petits plans d'eau ?

1.2.1 La température, le meilleur traceur spatial de l'état physico-chimique de l'eau ?

« Dans les lacs et les étangs, c'est la température qui est le grand moteur du mouvement ou de l'absence de mouvement vertical de l'eau. Elle détermine donc le fonctionnement trophique de l'ensemble du plan d'eau »

(Touchart, 2001, HDR, p.54)

1.2.1.1 Les propriétés physiques de l'eau influencées par la température

La température conditionne en grande partie le fonctionnement du plan d'eau. C'est l'élément fondamental auquel l'ensemble des processus physiques et biologiques du milieu aquatique est lié. La température a, d'une part, une influence directe sur les processus physico-chimiques. Son augmentation entraîne une diminution de la solubilité des gaz tels que l'azote et l'oxygène (Truesdale *et al.*, 1955) pour les plus importants. De fait, elle a un impact sur la biologie milieu aquatique, ainsi que sur celle du possible cours d'eau à l'aval d'un barrage. D'autre part, la température modifie la densité de l'eau, pouvant conduire à une stratification de la colonne d'eau directe en été ou inverse en hiver. La courbe de la densité de l'eau en fonction de la température est une parabole avec pour sommet la valeur de densité maximale de l'eau, soit environ 4°C (3,96°C pour une eau douce, Hutchinson, 1957). C'est-à-dire que, en dessous de cette valeur de 4°C, plus l'eau est froide, moins elle est dense. Au-dessus de 4°C c'est l'inverse, plus l'eau est froide, plus elle est dense. Cette différence de densité des eaux est due à la diminution des associations de molécules entraînée par une augmentation de la température (« *augmentation des vides intermoléculaires* », Dussart, 1966) qui entraîne l'augmentation de la densité. En revanche, cette même augmentation de la température provoque une dilatation qui va faire baisser la densité de l'eau. Lorsque la dilatation thermique l'emporte sur l'augmentation de densité, la densité de l'eau diminue avec l'augmentation de la température. C'est à la valeur de 4°C que les processus s'inversent. En dessous de 4°C, la diminution des associations de molécules avec l'augmentation de la température l'emporte, tandis qu'au-dessus c'est la dilatation

thermique qui l'emporte. Les différences de densité entre deux températures est d'autant plus forte que la température est élevée (Birge, 1909). De ce fait, plus l'eau est à une température élevée, plus la stratification thermique est forte. Il devient alors plus difficile pour les facteurs de forçage externe de venir briser cette stratification.

La capacité du plan d'eau à se stratifier affecte la dynamique biologique et phytoplanctonique, soit l'équilibre et la santé du milieu (Warren *et al.*, 2011). Les cyanophycées ou cyanobactéries peuvent, grâce à leurs vacuoles à gaz, se déplacer et assurer une flottaison, luttant contre la tendance à la sédimentation. Ces espèces ne sont pas nécessairement sujettes à une descente en profondeur en période de stratification. Lors de ces phases de stratification thermique, les algues mobiles ont tendance à prendre l'ascendant. Leur résistance à la sédimentation leur permet de se localiser dans les couches les plus favorables, tandis que les diatomées sédimentent vers le fond (Vinçon-Leite *et al.*, 2012). Les périodes de faible stratification ou d'homogénéité thermique du plan d'eau sont plus favorables à la domination de groupes phytoplanctoniques de type Diatomées. Ces algues non mobiles connaissent leur pic au printemps. Ces dernières sont appréciées dans un lac en bonne santé et donc vont être favorisées. Cette préférence peut être apportée par des méthodes de déstratification thermique, permettant le brassage forcé du plan d'eau, susceptible de favoriser le plancton non mobile (Touchart, 2001). Certaines espèces phytoplanctoniques ont un optimum thermique dans les valeurs élevées de température, à l'image des cyanobactéries de type *Anabaena* dont l'optimum thermique se situe entre 28 et 32°C (Goldman & Horne, 1983). Les fortes températures ont tendance à favoriser le développement des cyanobactéries au profit de diatomées. Ces dernières sont cependant préférées dans l'optique d'une bonne qualité de l'eau.

La variation spatiale de la température de l'eau conditionne également la répartition des espèces aquatiques, bien que dans un moindre degré que dans sa composante verticale. L'arrivée d'une eau froide d'un cours d'eau et les zones ombragées peuvent être des refuges pour les espèces les plus thermosensibles. Certaines algues, dont plusieurs espèces de cyanobactéries, sont sensibles à ces variations spatiales, préférant les zones de températures les plus élevés.

1.2.1.2 Une biogéographie aquatique déterminée par la température du milieu?

« Les variations de la température des lacs d'eau douce dans l'année ont une importance extrême, parce que c'est d'elles que dépend le renouvellement des eaux profondes, donc l'oxygénation de celles-ci et les possibilités de vie en leur sein »

(Guilcher, 1965)

La température de l'eau et la vie aquatique

La température est un régulateur majeur des phénomènes physiques, chimiques et biologiques du milieu aquatique. Son influence s'étend sur le métabolisme, les cycles de reproduction, les taux d'ingestion et de digestion des poissons, en particulier les espèces poïkilothermes (Tissot & Souchon, 2011). La température du corps de ces espèces poïkilothermes dépend de celle de l'eau. Leur développement et leur survie n'est possible qu'à l'intérieur de seuils thermiques, définis par leurs températures létales. Le dépassement de ces températures entraîne la mort rapide du poisson (Cocking, 1958). Il existe donc un seuil léthal mais également un intervalle de normalité dans lequel les principales fonctions de l'organisme fonctionnent correctement. Lorsque l'intervalle de normalité est dépassé, sans toutefois atteindre le seuil léthal, l'activité est ralentie ou momentanément stoppée. Le poisson entre alors dans une période de quiescence, qui se terminera lorsque la température retrouvera une valeur comprise dans l'intervalle de normalité. Cette quiescence fragilise et expose l'individu face aux prédateurs et maladies diverses (Brooker, 1981, cité par Touchart, 2001, Tissot & Souchon, 2011). Cette zone de résistance permet au poisson de résister un certain temps sans subir de dommages considérables.

Un intervalle thermique, situé à l'intérieur de l'intervalle de normalité, permet la reproduction, puis le développement. La température intervient dans la période d'éclosion des œufs (Crisp, 1988, cité par Touchart, 2000) ou encore le nombre de cycles reproductifs par an pour les invertébrés. Pour les poissons, leur période de reproduction est également influencée par le degré de chaleur de l'eau. Des températures minimales sont exigées par certaines espèces pour pouvoir se reproduire. La carpe, par exemple, se reproduit dans des eaux de température inférieures à la plage 18-20°C (Trotignon, 2000), tout comme la tanche, dans des eaux à 20°C.

En écologie aquatique, le nombre de degrés jours est l'unité permettant de calculer la durée de développement embryonnaire en fonction de la température moyenne journalière (Tissot & Souchon, 2011). Elle correspond généralement à la durée entre deux stades de développement définis. Elle correspond à la gamme de température optimale pour la reproduction, encadrée par des seuils thermiques inférieurs et supérieurs pour lesquels la fraie est inhibée. Des périodes critiques pour les organismes peuvent être considérés lorsqu'il y a une simultanéité entre un stress hydrologique lors de période d'étiage bas et une température élevée dans le milieu aquatique (Miller *et al.*, 2007, cité par Tissot & Souchon, 2011).

Parmi la très grande variété d'espèces, certaines espèces cibles sont utilisées car représentatives d'une tolérance thermique assez faible. La truite *fario* a une plage de confort de 4 à 19°C, tandis que son seuil de tolérance supérieur est établi à 24°C. Passés les 24°C, la truite dépasse son seuil léthal. Le chabot a une tolérance thermique plus forte, dont la plage de confort est comprise entre 2 et 17°C, la tolérance supérieure pouvant atteindre les 27°C. La moule perlière a une tolérance thermique allant jusqu'à 28°C, tandis que sa plage de confort oscille entre 0 et 23°C. En revanche, pour ces espèces, ce sont les quantités en oxygène qui en font une espèce exigeante, avec des besoins de saturation de l'eau en oxygène de plus de 98% (Bauer, 1988, Moorkens, 2000). Certaines espèces ont des tolérances thermiques élevées comme dans la famille des *Percidae* avec la perche fluviatile (*Perca fluviatilis*), le sandre (*Stizostedion lucioperca*), la brème commune (*Abramis brama*) ou encore le brochet (*Esox lucius*) pour lesquels les seuils létaux dépassent les 30 à 35°C. Ces gammes thermiques varient en fonction du stade de développement de l'individu. Ces seuils présentés correspondent à ceux d'une espèce à l'âge adulte, ils diffèrent et sont plus sensibles pour les stades embryonnaire ou larvaire.

Les données brutes de température sont un élément majeur dans la connaissance de la vie piscicole ainsi que leur répartition et habitat. Cependant, d'un point de vue thermique, il n'est pas le seul élément susceptible de modifier le comportement des espèces. Le cycle diurne de température et les amplitudes thermiques ont des effets sur le comportement biologique de certaines espèces.

Les migrations et déplacements des poissons sont régis par la température de l'eau et le débit. A l'automne, la chute des températures et l'augmentation des débits des cours

d'eau entraîne la mise en place des mouvements migratoires des truites (*Salmo trutta*) (Ovidio, 1999). Meyers *et al.* (1992) ont démontré des mouvements de migration de truites au printemps liés à l'augmentation de la température de l'eau également. Dans des zones hétérogènes, après des confluences ou suite à une perturbation thermique, les truites peuvent se déplacer jusqu'à des refuges thermiques se rapprochant de leur optimum (Goffaux, 1997). En dehors des phases de reproduction où les déplacements maximaux mesurés sur l'Ain sont de l'ordre de 24 km, la truite a une mobilité réduite, souvent liée à des changements alternés de gîte (Ovidio, 1999, Roy & Pichon, 2017). Les températures basses jouent également un rôle inhibiteur pour les truites (*Salmo Trutta*), lorsqu'elles descendent en dessous de 6°C (Euzenat & Fournel, 1976, Baglinière & Maisse, 1991).

Les liens entre la température et l'oxygène essentiels à la vie aquatique

L'oxygène est indéniablement lié à la vie aquatique et à la productivité du milieu. Sa répartition peut varier verticalement et horizontalement, dans le temps et l'espace. L'oxygène dissous est affecté par la température de manière directe et indirecte (Wetzel, 1983). De manière directe, la température affecte la solubilité de l'oxygène de façon non linéaire (Truesdale *et al.*, 1955). Une diminution de la température entraîne une augmentation de la solubilité de l'oxygène. L'évolution de la solubilité selon la température a été décrite dans une table (Mortimer, 1981).

La diffusion des gaz dans l'eau est un processus très lent. L'eau doit circuler au sein du plan d'eau afin d'établir un équilibre entre l'oxygène dissous et atmosphérique (Wetzel, 1983). La présence d'une stratification thermique est un frein à ces échanges, alors limités aux quelques mètres (en lac) à quelques centimètres (en étang) de la couche supérieure. Dans les lacs, durant la stratification thermique estivale, la distribution de l'oxygène suit une courbe de type clinograde pour les lacs eutrophisés, tandis qu'elle est orthograde pour les lacs oligotrophiques (Wetzel, 1983). Cette courbe se trouve uniquement sur des lacs très oligotrophes, assez rare, ou lors du début de la mise en place de la stratification thermique saisonnière. Une diminution forte de l'oxygène se produit en profondeur pour les lacs eutrophes, amenant à un anaérobie de la couche hypolimnique. Cet anaérobie peut avoir un impact sur la chimie des eaux profondes avec une possibilité de relargage de phosphore stocké dans le sédiment. Le phosphore relâché est alors source de nutrition de nombreuses algues dont les cyanobactéries benthiques présentes sur les sédiments (Warren *et al.*, 2011).

Les gradients d'oxygène dans la colonne d'eau d'un étang sont peu étudiés. De nombreuses hypothèses sont émises, liées à la forte productivité de ces plans d'eau, sans toutefois y apporter une étude complète d'un point de vue spatial et temporel (Dussart, 1966).

La connaissance de la présence et de l'intensité de la stratification thermique est fondamentale dans l'étude de la concentration en oxygène du plan d'eau. Les longues stratifications estivales lacustres créent une anoxie des eaux de fonds. La question réside dans la capacité des stratifications thermiques courtes, de l'ordre de quelques heures à quelques jours pour les plans d'eau polymictiques à développer l'anaérobie des eaux de fonds ?

La distribution spatiale de l'oxygène, de même que la température, déterminent la distribution des espèces aquatiques, au sein de la colonne d'eau et dans sa répartition horizontale. En sortie de l'étang, la récupération de l'oxygène par le cours d'eau dépend de la chute d'eau, des turbulences en cours d'eau ainsi que de la récupération thermique naturelle du cours d'eau. Le problème d'insuffisance d'oxygène de la couche de fond en période de stratification est à considérer pour l'étude des liens entre les plans d'eau et les cours d'eau. En étang, lors de la présence d'une prise de fond de sortie d'eau il est important de connaître sa teneur en oxygène. L'absence d'oxygène des couches de fond devient un problème majeur s'il est amené à affecter les eaux courantes en aval et influencer le biotope lotique.

L'analyse de la température des plans d'eau est un outil fondamental à la compréhension des milieux aquatiques. Par sa capacité à se stratifier, le plan d'eau possède des conditions physico-chimiques particulières qui diffèrent des cours d'eau. La grande majorité des espèces, du plancton au poisson, sont régies par la température, ses variations ainsi que ses liens directs ou indirects avec l'oxygène. La répartition du plancton, zooplancton et donc de la nourriture pour bien d'autres espèces, est influencée par la dispersion spatiale de la chaleur au sein du plan d'eau. L'étude spatiale de la température apporte un atout majeur à la compréhension globale du système plan d'eau, aux échelles verticales et horizontales. La simplification en un seul point de mesure, qui est censé être représentatif, est en fait une approximation et ne permet pas d'englober l'ensemble des connaissances spatiales de variation de température. La température, elle seule, est limitée afin de caractériser les échanges de chaleur entre les milieux aquatiques. Les impacts thermiques,

44

la capacité de résilience du milieu aval ainsi que sa capacité d'autoépuration sont dépendants du volume d'eau. Le seul moyen de connaître l'efficacité d'une dérivation, l'impact d'un étang à déversoir de surface sur le cours d'eau aval ou la capacité de résilience du milieu face au risque thermique est de croiser la température avec le volume d'eau. Ce couplage est le propre du bilan thermique, permettant de mesurer les échanges calorifiques entre le plan d'eau et son environnement, soit l'atmosphère, la nappe souterraine ou principalement le cours d'eau.

1.2.2 L'analyse spatiale des données thermiques, ouverture vers une nouvelle réflexion géographique

1.2.2.1 L'analyse spatiale de la température des grands lacs

A l'inverse des eaux courantes, les mouvements verticaux sont dominants pour les eaux stagnantes. Par leur variation de densité, les différentes strates volumiques du plan d'eau ont des caractéristiques physico-chimiques variées lors des phases de stratification thermique, lorsqu'il existe une différence de densité entre la surface et le fond. La zonation spatiale de ces paramètres est plus réduite mais existante (Touchart, 2001, Abbasi *et al.*, 2016, Soullignac, 2017). Quelques auteurs se sont penchés sur les questions spatiales en limnologie, depuis le 20^{ème} siècle, initiées par le chercheur écossais Wedderburn. Ce dernier précisa, dans sa publication sur la température des lacs écossais (1910) : « *Other local variations [of temperature] are due to the state of the surface of the lake, which in some parts may reflect more heat than in others, and so produce local differences. The inflow of rivers also produces local differences* » (Wedderburn, 1910, p. 112). Depuis, des analyses de la zonation spatiale du plan d'eau ont mis en avant certaines variations entraînant des dissociations de masses d'eau à l'intérieur d'un lac. Les premières analyses sont basées sur l'arrivée d'un tributaire dans un lac, créant localement des perturbations.

L'hétérogénéité spatiale a été étudiée en premier lieu sur les grands lacs en comparant les écarts thermiques entre le littoral et le large. Certaines études ont également été menées sur les écarts thermiques entre deux bassins lacustres ou liés à l'arrivée d'eau d'un tributaire. Sur le lac Léman, F. Milon effectua une analyse géographique en comparant les deux rives orientales et occidentales, ainsi que ce qui est nommé le « petit lac » et le «

grand lac ». « *Mais il y a de grandes variations locales, la rive orientale est évidemment la plus chaude puisque c'est la mieux exposée, des influences locales créent pourtant des irrégularités comme par exemple l'apport des eaux froides des torrents, quant aux eaux pélagiques, elles paraissent au contraire, dans le grand lac, plus froides du côté oriental que du côté occidental, l'auteur en attribue la cause à des courants, mais ce n'est là que l'hypothèse, d'ailleurs très vraisemblable. Le petit lac, mieux abrité des vents du Nord, est plus chaud que le grand lac.* » (F. Milon, citée par Vivier, 1929, p.7). L'analyse complète permet de mettre en avant de nombreux écarts de fonctionnement thermique encore mal décrits et peu connus. Sur des lacs suédois, R. Melin perçoit un intérêt d'analyser chaque bassin du lac Klemmingen comme une entité indépendante : « *As the different basins are separated by narrow and shallow passages they appear, in thermic respects, practically as three separate lakes with rather different conditions.* » (R. Melin, 1939, p.10). Le fractionnement du plan d'eau en plusieurs bassins avec un possible fonctionnement thermique distinct a été peu repris et les écrits sont rares. Pourtant, ces aspects sont fondamentaux dans le diagnostic des plans d'eau. C'est en 2002 que L. Touchart introduit la notion de « *région limnique comme étant un volume d'eau possédant une certaine unité et se distinguant des autres volumes du même lac [...]* » (Touchart, 2002, p.29).

Les analyses thermiques spatialisées en lac ont mis en évidence la zonation effective de plusieurs masses d'eau ou plusieurs régions limniques. Au même titre que l'hétérogénéité verticale, il existe une hétérogénéité horizontale en lac. Cependant, l'aspect horizontal a été peu étudié et les quelques études sont principalement localisées sur les grands lacs, là où la grande superficie apporte l'hypothèse d'une plus forte variation spatiale (Prats & Danis, 2018).

1.2.2.2 Les travaux sur petits plans d'eau mettent également en avant une zonation de la température

Sur les étangs, quelques chercheurs se sont penchés sur l'effet de la végétation sur la stratification et la répartition de chaleur. Brunaud (2007) sur l'étang de Landes et Coates & Folkard (2009) sur l'étang de Priest Pot (Royaume-Unis) ont effectué des recherches en comparant les variations de températures entre les zones végétalisées du littoral et celles de pleines eaux. Pour le grand étang de Landes, le plus grand du département de la Creuse avec 86 ha de superficie, les variations de températures ont été comparées selon le type de

végétation hygrophile immergée. Il s'est avéré que le type de végétation peut avoir une influence sur la température de l'eau mais également sur sa capacité à stratifier ou à brasser la colonne d'eau. La différence ne se limitant pas à la température de surface mais bien à l'ensemble de la colonne d'eau. L'analyse large/littoral sur l'étang britannique de Priest Pot sur deux journées apporte des résultats similaires, malgré sa taille inférieure à 1 ha. Le littoral dominé par la présence de nénuphars (*Nymphaea alba*) a une dynamique thermique qui diffère de celle du large. La température semble plus élevée d'environ 1°C dès les premiers centimètres de profondeur. La tendance à la stratification y est renforcée dans la zone littorale. La présence d'une différence thermique au sein d'un étang de moins d'1 ha remet en cause les hypothèses de nombreux limnologues, bien que la présence de plantes hygrophiles immergées ait une influence sur la structure thermique des littoraux.

Les observations de Cathcart & Wheaton (1987) ont montré que la variation horizontale de température d'un étang piscicole de 0,17 ha (2,2m de profondeur maximale) était inférieure à 0,5°C « *in most occasions* » (cité par Losordo & Piedrahita, 1991, p.192). Cet aspect a toutefois été laissé de côté, l'écart ayant été jugé insignifiant comparé à la différence de température verticale, pouvant dépasser les 12°C sur ce même plan d'eau. Ce chiffre, de 0,5°C est tout de même significatif pour un étang de quelques mètres carrés et il mériterait une étude plus approfondie à une échelle temporelle plus fine. A quelles périodes et selon quelles circonstances se créent ces écarts de température ? Si la valeur moyenne est de 0,5 °C, jusqu'à quelle valeur ces écarts peuvent-ils être perçus ?

L'ensemble des auteurs ayant suivi une logique géographique de l'analyse de la température de l'eau semblent s'être limités, pour la plupart, à des analyses descriptives. Obnubilés par la variation dans la composante verticale, le gradient de température horizontal reste pour eux anecdotique. Les difficultés liées aux mesures peuvent expliquer la crainte de certains auteurs dans des valeurs faibles. Le délai de mesure de la température peut s'avérer long et engendrer des marges d'erreurs importantes. C'est d'autant plus vrai que le lac est profond et de grande superficie, tout comme l'ancienneté de l'instrument de mesure. De fait, en comptant le temps de déplacement entre les points et le délai de mesure, l'auteur peut se questionner sur la cohérence des points de mesure, espacés d'une temporalité pouvant être conséquente et entraîner, par nature, une différence de température faussée. De nombreux facteurs peuvent influencer les températures assez

rapidement, tels que le vent ou une augmentation importante de la température de l'air. L'hypothèse du jugement d'un manque de pertinence entre les différents points, répartis sur la journée ou quelques heures, peut justifier la marge d'erreur. L'écart horizontal de température étant rarement conséquent, les auteurs préfèrent sûrement ne pas la prendre en compte ou l'interpréter.

Nous proposons de remettre en avant ici l'analyse géographique intégrant les composantes à la fois verticales et horizontales de la masse d'eau, rendue possible grâce aux enregistreurs thermiques en continu. Ces enregistreurs automatiques permettent la mesure en simultané de la température en plusieurs points du plan d'eau et donc l'analyse des écarts de température et de fonctionnement thermique du plan d'eau dans l'hypothèse où il existe des régions limniques à l'intérieur des lacs, mais aussi des étangs. Ces derniers sont des pièces d'eau particulières dont le fonctionnement thermique, la localisation géographique et le contexte à la fois historique, social, économique et environnemental en font un point d'intérêt majeur de la géographie limnologique.

1.3 Les particularités géographiques et limnologiques des étangs

1.3.1 L'objet étang dans son environnement

La géographie mêle à la fois les problématiques physiques et sociales autour des plans d'eau et cours d'eau de nos territoires. A l'interface entre un besoin humain et des questions physiques, les plans d'eau artificiels sont de plus en plus étudiés, souvent comme des ruptures de pentes ou des obstacles dans le linéaire hydrologique. Parmi ces plans d'eau artificiels, les étangs sont un objet géographique particulier, mêlant à la fois les questions de limnologie physique, à l'interface entre le cours d'eau et le plan d'eau, le lac et la mare, mais aussi les questions sociales, l'étang ayant été construit pour un besoin économique ou de divertissement. Pour les plus anciens, ces pièces d'eau ornent les paysages ruraux depuis des centaines d'années et font partie intégrante du petit patrimoine rural et hydraulique (Bartout, 2015, Mathis & Mathis, 2016).

Les plans d'eau artificiels et de petites tailles sont peu étudiés. Les grands lacs et notamment les plus profonds concentrent les attentions scientifiques depuis le début de la limnologie. La profondeur questionne vers un inconnu, un espace inaccessible tandis que les fonds de quelques mètres au maximum rendent banale leur analyse. Pourtant, les petits plans d'eau peu profonds restent une quasi inconnue scientifique. Leur morphologie n'attire pas fondamentalement les études, alors que leur grand nombre devrait susciter les recherches. Avec plus de 250 000 étangs en France métropolitaine (Bartout, 2006), comment pouvons-nous montrer aussi peu d'intérêt vis à vis de ce qui nous entoure ? Mais comment définir ces milieux dont l'image a été détériorée, considérés comme des milieux de l'horreur ou de la peur, comme des contraintes environnementales ou des espaces abandonnés ? Lorsqu'ils sont attractifs et valorisés, ils sont appelés lacs, alors qu'ils sont tout autant des étangs que leur voisin abandonné de toute activité récréative ou touristique mais dont l'usage nécessite une valorisation passant par son appellation. La définition de ces plans d'eau est complexe et mérite une nouvelle attention lorsque l'on s'intéresse à la géographie limnologique (Touchart, 2007).

1.3.1.1 Quelle pièce d'eau étudions-nous lorsque l'on parle d'étang ?

En hydrologie, une eau stagnante diffère de l'eau courante par la direction et la complexité de ses mouvements. En eau courante, les mouvements sont dominés par l'effet de la pente et sont donc unidirectionnels. En plan d'eau, le gradient gravitaire est absent, les courants en cascade, les contres courants et les cellules sont prédominants (Touchart, 2000). Les déplacements se font donc dans plusieurs directions avec une vitesse de courant relativement faible. Cette dernière entraîne une stagnation des eaux et donc une possibilité d'établissement d'une stratification thermique. Les plans d'eau diffèrent des autres milieux aquatiques par leur réponse aux conditions externes, dont la température (Pourriot et Meybeck, 1995). La dissociation entre l'objet plan d'eau et cours d'eau est relativement évidente, hormis pour certains milieux à l'interface entre les deux, à l'image des seuils ou certaines zones humides.

Au sein des plans d'eau, les dissemblances entre lac, étang et mare compliquent les définitions. Comment différencier les étangs des autres plans d'eau ? Leur fonctionnement diffère et leurs pressions sociale, législative et environnementale sont propres à chacun sans toutefois bénéficier de définition simple et unique pour chaque pièce d'eau.

d'un mode de gestion et d'une protection appropriée démarre par la caractérisation du milieu et sa définition. Or, en Europe, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) de 2000 tente d'harmoniser les politiques de l'eau à l'échelle du continent européen tandis que chaque pays a sa propre perception d'un étang, d'un lac ou d'une mare selon leur localisation et leur aire d'influence culturelle.

Comment mettre en valeur des milieux non définis et non délimités ?

Dès que l'on prononce le mot « étang », chaque personne le définit en fonction de ses connaissances, son domaine de prédilection ou encore sa localisation géographique. Ces problématiques concernent les scientifiques, où un biologiste (Biggs *et al.*, 2005, Oertli & Frossard, 2013), un juriste (Cizel, 2010), un économiste (Masson *et al.*, 2005), ou un géographe (Touchart, 2007) ont un regard différent sur ces milieux et proposent des définitions adaptées et orientées. Les disparités dans la compréhension et l'appropriation de ces milieux diffèrent également en fonction de la localisation géographique. Quand pour un habitant de Sologne, les étangs signifient des petits plans d'eau artificiels, présents par milliers dans la région pour la chasse ou la pêche, ils correspondent à de grandes lagunes littorales pour un habitant du pourtour méditerranéen (étang de Thau, étang de l'Or, étang de Leucate), ou encore à des gravières dans les lits majeurs des grands cours d'eau (Moselle, Somme, Rhin, Loire...). Comment uniformiser la connaissance, la description, l'analyse et la protection de ces milieux lorsqu'il n'existe pas de définition commune ? L'absence de définition simple et commune pose soucis aux échelles régionales mais aussi nationales et européenne, où la Directive Cadre sur l'Eau doit harmoniser les prétentions et modes de protection des milieux aquatiques.

Complexité de définition à l'échelle européenne menant à des incompréhensions locales

L'ensemble des plans d'eau souffre d'une absence de définition homogène à l'échelle française mais aussi et surtout à l'échelle européenne. Les particularités locales induites par les différences linguistiques, culturelles et géographiques ont créé un patchwork du terme « étang », dont le mot désigne des milieux au fonctionnement physique différent. Les étangs sont regroupés généralement dans le terme anglo-saxon de « pond », qui a la particularité d'intégrer tous les plans d'eau de faible superficie, à la fois naturels ou artificiels (Williams *et al.*, 2003). Le terme signifie cependant plus souvent des petites mares naturelles (Biggs *et al.*, 2005, EPCN, 2009, Boix *et al.*, 2012 Oertli & Frossard, 2013) dont les problématiques diffèrent

des étangs sur le territoire français. A une échelle plus englobante, le terme de Small Water Body (SWB) ou Shallow Water Body est de plus en plus utilisé pour désigner l'ensemble des petits plans d'eau, lacs, étangs et mares compris (Nagarajan *et al.*, 2004, Condie & Webster, 2001). Il en est de même pour le toponyme italien « stagno » (Bartout, 2012), regroupant l'ensemble des petits plans d'eau dont la prédominance artificielle est peu présente (Donati, comm. or. 2018). Dans certaines langues, la dissociation entre les plans d'eau se font par la dualité artificiel/naturel. En allemand, les *weiher* naturels s'opposent à l'artificialité des *teich*. Ils sont dissociés par la dualité des *Numa* et *Ike* en japonais, ainsi que les *järv* et *tiik* en estonien par exemple. Lorsque la dualité naturel et artificiel est privilégiée dans la langue, le critère de superficie ou profondeur importe peu. Ces critères sont liés aux aires d'influences linguistiques mais également aux particularités locales. En Estonie, la grande majorité des petits plans d'eau sont des lacs (Estonian lakes inventory, 2006). Les lacs de « *bog pool* » ou d'ancien culots glaciaires du pays sont de très petite taille bien qu'appelés *järv* (« lac ») (Terasmaa & Punning, 2006, Vainu & Terasmaa, 2016). Les quelques étangs piscicoles artificiels présents sur le territoire estonien sont donc souvent de superficie supérieure aux lacs, ne permettant pas d'instaurer le critère de superficie comme fiable.

A l'inverse, dans quelques pays d'Europe de l'est, c'est la superficie qui est le facteur essentiel de différenciation des plans d'eau. En polonais, le mot *staw* désigne les étangs et représente généralement une étendue d'eau stagnante déterminée par les précipitations et l'évaporation et isolée de tout autre réseau hydrographique (Golus & Bajkiewicz-Grabowska, 2017), d'une superficie inférieure à 10 ha (Skwierawski, comm. or., 2017).

La complexité de définition des plans d'eau en Europe met en avant l'intrication d'une politique commune à l'échelle de l'Europe, menée par le Directive Cadre Européenne sur l'eau 2000. Qu'appelle-t-on étang ? Quelles définitions pouvons-nous prendre en compte et comment les adapter aux particularités locales ? L'absence de définition commune engendre des difficultés pour la gestion, la valorisation et la protection de ces milieux où, pour le même plan d'eau, celui-ci sera protégé dans un pays, alors que la volonté de le supprimer domine dans un autre.

Les définitions et délimitations de l'étang dans la bibliographie scientifique

En langue française et pour l'inventeur de la limnologie, la définition de l'étang est la suivante : « *Les mares et étangs sont des étendues d'eau auxquelles il manque la zone profonde aphotique des lacs* » (Forel, 1904). L'approche est géographique et biologique, entendant que les étangs sont des étendues d'eau assez peu profondes permettant que la végétation puisse y pousser dans sa totalité. La caractéristique principale considérée est la profondeur maximale et restera le déterminant majeur de séparation entre les lacs, étangs et mares d'un point de vue scientifique (Wiszniewski, 1953, Hutchinson, 1957, Lewis, 1983).

B. Dussart, dans son ouvrage de limnologie (1966) identifie les étangs selon leur composante morphologique mais également temporelle et usagère. Leur particularité réside dans un faible volume d'eau comparé aux lacs, bien que leurs métabolismes soient proches. Le volume provoquant une plus faible inertie et donc une réponse plus rapide des étangs face aux forçages climatiques. L'approche de Dussart intègre la notion de temporalité dans la définition des étangs, les classant comme des « *lacs à évolution rapide* » (Dussart, 1966, p.234). Les étangs sont admis comme des milieux particuliers dont le métabolisme, bien que « proche », diffère de celui des lacs, n'en apportant pas plus de précision.

La définition des étangs englobe des dimensions de plans d'eau assez larges dont les limites sont encore floues. W. Pichler en 1939 puis L. Touchart en 2001 se sont accordés à attribuer une limite de profondeur basse de 0,6 à 0,8m entre la mare et l'étang. La limite haute est quelque peu plus changeante au fil des auteurs dont les valeurs oscillent entre 5m (Wilhelm, 1960, Arrignon, 1998), 6 m dans la définition de Ramsar ou encore 8 m (Oertli et Frossard, 2013, Trintignac *et al.*, 2013) pour la plus profonde. La composante verticale est essentielle dans la délimitation des seuils entre les différents types de plan d'eau puisque la stratification thermique, les déplacements phytoplanctoniques, les échanges chimiques ainsi que les processus de sédimentation sont dominés par eux. La valeur de profondeur reste déterminante bien que la limite haute entre l'étang et le lac reste floue, entre 5 et 8 m de profondeur maximale. Existe-t-il réellement des phénomènes caractéristiques des lacs au-dessus d'une telle profondeur ? La profondeur seule peut-elle être un critère suffisant ?

La composante horizontale d'un plan d'eau est la plus facile à connaître par l'analyse de photographies aériennes ou par télédétection. Elle reste la plus difficile à cerner dans ses

limites supérieures et inférieures de l'étang et sur son influence sur le milieu. Les auteurs proposent des limites surfaciques supérieures très variées. Ces valeurs s'étalent de 2ha (Williams *et al.*, 2003) à 100 ha (Touchart, 2016) avec des valeurs intermédiaires de 5 ha (Oertli, et Frossard, 2013), 8 ha pour Dugan (1992)² dans la convention de Ramsar ou encore 50 ha (Bartout, 2006). Dans l'application française de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau de 2000, insufflant un cadre législatif aux états membres, la limite entre la masse d'eau cours d'eau et plan d'eau, cette dernière comprenant les lacs, a été fixée à 50 ha. Cette limite insinue un changement de fonctionnement entre les plans d'eau supérieurs à 50 ha et ceux inférieurs. Ou, en d'autres termes, une limite surfacique estime que des phénomènes particuliers aux lacs ont lieu à partir d'un certain seuil.

Les critères majeurs de délimitation et définitions, sur les composantes naturelles ou artificielles, sur le critère historique de la profondeur ou l'apparition du critère de la superficie permettent-ils de borner les différents types de plans d'eau ? Il est difficile d'établir une définition en utilisant l'un ou l'autre critère, le choix de la multitude de paramètres, en associant le caractère anthropique, la profondeur maximale ainsi que la superficie peuvent amener à de meilleurs résultats.

Les étangs, des plans d'eau artificiels à dynamique thermique particulière

Les étangs sont assez largement ancrés dans les esprits par leur petite taille, ou plus simplement par ce qui est plus petit qu'un lac, ainsi que par leur caractère artificiel. Ces deux critères majeurs leur valent une grande part des maux actuels. Leur petite taille ne joue pas en faveur de leur connaissance et encore moins de leur reconnaissance. Alors que les services administratifs n'ont pas élaboré de recensement exhaustif du nombre de plans d'eau de petites tailles, des chercheurs les dénombrent par centaines de milliers en France (Bartout & Touchart, 2013) et plusieurs millions en Europe (Verpooter *et al.*, 2014). Les étangs sont généralement considérés comme des plans d'eau artificiels ce qui les place comme des obstacles à la naturalité de nos milieux aquatiques.

Des plans d'eau peu avantagés par leur petite taille

Pour reprendre un article de B. Oertli sur les étangs (Oertli *et al.*, 2012), le titre paraphrase Leopold Khor en citant « *small is beautiful* ». Oui mais « *Big is powerful* »³, et là

²Dans Oertli & Frossard, Mares et étangs. Ecologie, gestion aménagement et valorisation, 2013.

³Cité dans ce même article (Oertli *et al.*, 2012)

est toute la complication des étangs, dont leur petite taille leur confère peu d'attractivité et les laisse souvent oubliés ou faiblement considérés. Il a fallu attendre 2013 pour avoir un inventaire quasi-exhaustif de ces plans d'eau à l'échelle française (Bartout & Touchart, 2013) et non les quelques chiffres approximatifs, souvent réduits à des inventaires régionaux.

Au même titre que les lacs ont longtemps été considérés comme des « *mini océans* » dans leur fonctionnement (Serruya 2012), les étangs ont été considérés comme des « *mini lacs* » (Loup, 1974). Or, depuis quelques décennies, les mesures en étang se sont multipliées et ont apporté des connaissances nouvelles sur ces plans d'eau.

Selon leur alimentation, sur source, par présence d'un cours d'eau temporaire ou permanent, ou par ruissellement, l'étang se constitue une forme particulière. Les étangs de plus faible superficie sont localisés sur source ou en tête de bassin, sur des cours d'eau de petit rang de Stralher (1957). Sur les parties les plus en aval, bien qu'encore souvent localisés à l'intermédiaire entre la tête de bassin et l'aval, les étangs sont de plus grande taille, barrant des cours d'eau de rang supérieur. La localisation, sur versant, en fond de vallons, dans des vallées à fond plat ou encaissées, en plaine argileuse etc. lui procure une forme et une profondeur particulière. Les étangs sur versant par exemple dépassent rarement les 0,5 ha en Limousin (Bartout, 2006).

A l'intérieur des limites de surface et de profondeur entre l'étang et le lac, plusieurs seuils peuvent être ajoutés au sein même des étangs (Papon & Touchart, 2003, Carlini, 2006). Certains auteurs ont établi une typologie des étangs selon leur superficie et leur profondeur et dont la toponymie reflète les liens entre les différents types de plans d'eau. P. Bartout (2006) dissocie 4 grands types d'étangs afin de lisser les seuils existants entre la mare et le lac. La *mare-étang* et *l'étang-mare* se rapprochent le plus des morphologies des mares, tout en gardant leurs caractéristiques d'étangs. Plus loin, ou du moins plus profond et plus grand, on trouve *l'étang-lac* puis le *lac-étang*. Ces transitions sont dictées par l'hypothèse que la superficie et la profondeur du plan d'eau dominant le fonctionnement thermique interne. En d'autres-mots, les lacs-étangs, par leur grande taille et profondeur conséquente, pourraient voir en leur sein des variations verticales et horizontales de température durables proches de celles des lacs. A l'inverse, les mares-étangs, ne connaissent que très peu d'hétérogénéité, se rapprochant du fonctionnement des mares. A une échelle plus précise, certaines études

ont démontré l'existence de fonctionnement thermique et hydrologique distincts entre un étang petit et profond, et un étang pelliculaire (Al Domany, 2017)⁴.

La différence entre la mare, l'étang et le lac pourrait dépendre avant tout de l'échelle géographique. A l'échelle du bassin versant, la mare est définie comme un limnosystème dépendant, l'étang un limnosystème de versant et le lac un limnosystème de bassin (Touchart, 2007). La dissociation cause une différence dans les aires d'alimentation et dans la réponse du plan d'eau face aux forçages externes. Cette approche est privilégiée dans cette étude car elle intègre le fonctionnement interne au plan d'eau, soit sa capacité à se stratifier, ainsi que les liens externes qu'ils soient l'influence d'un tributaire sur le plan d'eau ou l'influence d'un plan d'eau sur le tributaire. L'artificialité de l'étang est également prise en compte puisqu'elle impacte le fonctionnement du plan d'eau par sa morphologie particulière.

1.3.1.2 L'étang, un plan d'eau artificiel dans sa définition et son fonctionnement

L'artificialité de l'étang ancrée dans son origine linguistique

L'origine du mot étang est le terme *estanc*, signifiant une étendue d'eau dont un barrage empêche l'écoulement (Picoche, 1992, cité par Genest, 2007). La connotation anthropique est présente dans de nombreuses définitions, dont la chaussée a longtemps été la marque de délimitation et de reconnaissance des étangs (Bartout, 2012). Le terme occitan nous rappelle la notion de présence sur un cours d'eau avec le mot *estancar* (Genest, 2007), donnant directement *estanc* ou *estanh* en occitan, *estany* en catalan⁵. La notion anthropique de l'étang est donc fondamentale depuis des siècles dans la langue française et ses particularités locales. L'étang est un objet construit par l'homme répondant à une demande sociale et pouvant être détruit. Les étangs sont des plans d'eau à évolution rapide (Dussart, 1966) dont la durée de vie est à l'échelle humaine, tandis que les lacs répondent plus à des échelles de temps géologiques. Les étangs les plus anciens sembleraient dater de l'époque gallo-romaine, pour l'élevage de la carpe. A partir du 10^{ème} siècle, ces pièces d'eau se sont multipliées, sous la houlette des religieux dont principalement les moines. Cette demande

⁴L'étang du Château (0,4 ha, 4,2m de profondeur maximale) et l'étang pelliculaire (8,7 ha, 0,8 m de profondeur maximale)

⁵Ces termes ont donné directement leur nom à des villes et villages comme Capestang dans l'Hérault et Cabestany dans les Pyrénées-Orientales

sociale est initialement liée au besoin en poisson pour le respect du jeûne dans la religion catholique au Moyen-âge, puis pour l'utilisation de la force hydraulique, pour la pêche ou encore les loisirs à notre époque. Les étangs sont ancrés dans un territoire et sont la résultante d'une demande socio-économique forte (Bartout, 2007, Lévêque, 2016). Leurs valeurs économiques, récréatives ou cynégétiques restent les principales fonctions des étangs de nos jours.

Une artificialité impactant son fonctionnement thermique

La colonne d'eau d'un étang se limite à quelques mètres de profondeur au maximum et est donc comprise à l'intérieur de la couche de saut thermique, décrite comme la partie supérieure du lac la plus influencée par le forçage climatique (Imberger *et al.*, 1985). La profondeur maximale réduite des étangs a longtemps sous-entendu une absence de stratification thermique durable, avec une homogénéité de la colonne d'eau à l'image des grands lacs peu profonds (Papon, 2007). Or, leur faible profondeur est compensée par une profondeur relative importante du fait de leur petite taille. L'apport technologique de mesures en continu, initiées par L. Touchart (2001) en étangs, a démontré une structure thermique de l'étang qui lui est propre, à l'interface entre le lac et la mare (Figure 4).

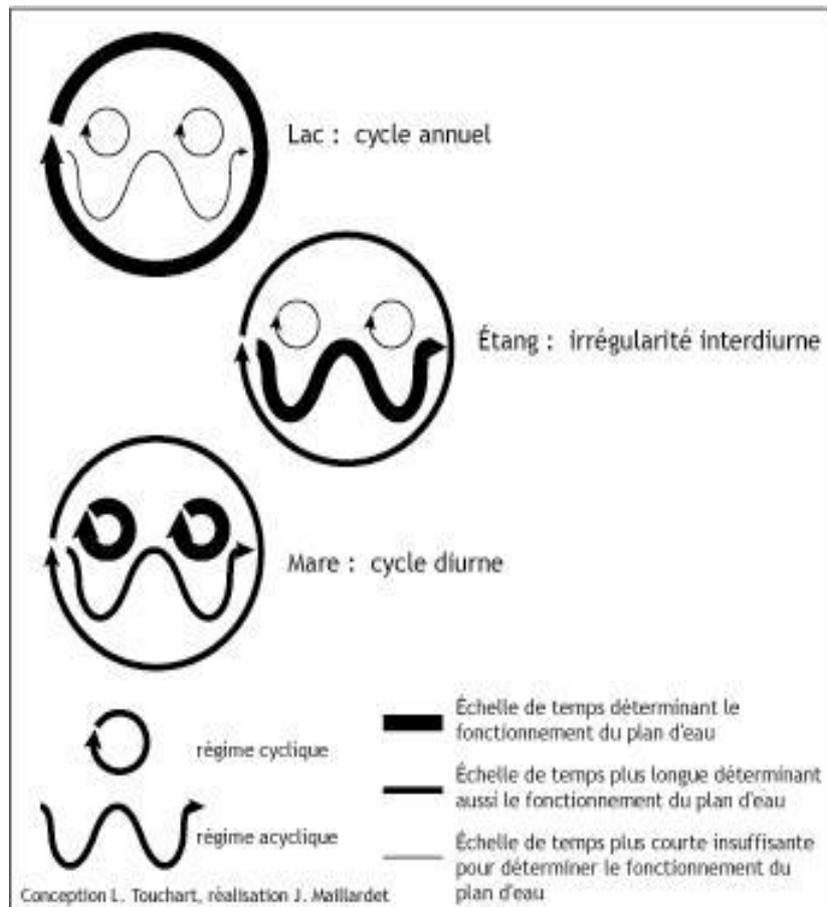


Figure 4: Les plans d'eau et leur régime thermique (Touchart, 2007)

L'étang se situe dans la même catégorie que les lacs de barrage ou *reservoir* pour les anglo-saxons et diffère des lacs dont l'origine est naturelle (Dussart, 1966, Hayes *et al.*, 2017, Poff & Hart, 2002). L'artificialité du plan d'eau lui confère une morphologie particulière. Par sa nécessité d'être vidangé, son fond est en pente orientée vers la chaussée ou le barrage. La zone la plus profonde est située près de la chaussée tandis qu'il est globalement proche du centre géométrique en lac naturel. La morphologie des étangs ou lacs de barrage apporte une réflexion géographique supplémentaire à la répartition spatiale des processus internes au plan d'eau. La zone profonde est la plus éloignée des affluents, tandis qu'elle est la plus proche de l'émissaire. Cette zone est la plus à même de se stratifier et donc entraîner une dissociation thermique et physico-chimique conséquente avec le cours d'eau. L'hétérogénéité spatiale des éléments physico-chimiques de l'eau dont principalement la température, peut être favorisée par la morphologie des plans d'eau artificiels. L'éloignement du point le plus profond du centre géométrique fait que la partie profonde de l'étang se limite généralement à une faible représentativité. En lac, la zone profonde est proportionnellement

dominante face au littoral, tandis que l'inverse est constaté en étang et dans certains lacs de barrage. De ce fait, la question de la représentativité des données prélevées en un seul point de l'étang, soit au point le plus profond, peut faire débat. La mesure des paramètres physico-chimiques en un seul point est largement représentée dans les administrations et notamment pour les 42 étangs de plus de 50 ha compris dans le protocole de suivis DCE (Prats *et al.*, 2018). L'artificialité de l'étang lui confère des particularités morphologiques mais également de gestion, dont le type de sortie d'eau et le débit sortant peuvent être contrôlés.

En suivant la classification thermique des plans d'eau de Lewis (1983) et d'après les mesures de L. Touchart sur le Limousin depuis 1999 (1999, 2001, 2002, 2007, 2010, 2016) et Folkard *et al.* au Royaume-Uni (2007, 2009), les étangs sont considérés comme des plans d'eau polymictiques discontinus. Cette classification correspond à une stratification possible de plusieurs jours pendant la période estivale. Les premiers écrits sur la polymicticité des plans d'eau s'attardent sur les lacs pelliculaires et les mares (Wiszniewski, 1953). Lewis (1983) intègre la différence entre polymictique continu dont la stratification est journalière, correspondant aux mares et étangs très peu profonds (mare-étangs), et polymictique discontinu avec une stratification thermique plurijournalière. Les étangs entrent dans la catégorie des plans d'eau polymictiques discontinus, côtoyant les grands lacs superficiels tels que le lac Peipsi (Peipsi järv, Estonie/Russie) ou le Balaton en Hongrie (Papon & Touchart, 2003). Malgré la petite taille des étangs, leur profondeur relative (Hakanson, 1996) leur confère une plus forte résistance à l'effet du vent sur la colonne d'eau que les lacs superficiels. L'action du vent, apportant de l'énergie dans les couches du fond, est d'autant plus efficace que la course du vent est importante (Papon, 2007). De fait, les étangs s'ancrent dans une catégorie encore dominée par les lacs. Ces derniers, bien que pelliculaires, ont une superficie importante induisant des phénomènes lacustres liés à la course du vent. Les étangs sont de plus petite taille, induisant une réponse différente aux forçages externes lié à une plus grande profondeur relative.

Par définition, les étangs sont souvent considérés comme homogènes du fait de leur faible profondeur, dont l'esprit renvoie à la connaissance que l'on a des lacs. Les écarts de température étant faibles dans les premiers mètres des lacs profonds, on considère que l'étang dont la profondeur est comprise à l'intérieur de cette couche supérieure lacustre, n'a pas de variations de température. Or, par leur forte dépendance à leur bassin d'alimentation

et leur profondeur relative importante, les étangs ont un fonctionnement thermique interne particulier. Leurs caractéristiques leur procurent une capacité à se stratifier relativement importante comparée à leur taille. Leur artificialité et leur temps de rétention court les rapprochent des lacs de barrage, dont le fonctionnement thermique diffère également de celui des lacs naturels (Casamitjana *et al.*, 2003, Hayes *et al.*, 2017). La grande majorité de la radiation solaire est stockée dans les premiers centimètres en étang, alors que les brassages plus fréquents entraînent une plus forte dispersion de la chaleur dans les eaux de fond (Touchart, 2002, 2007) (Figure 5).

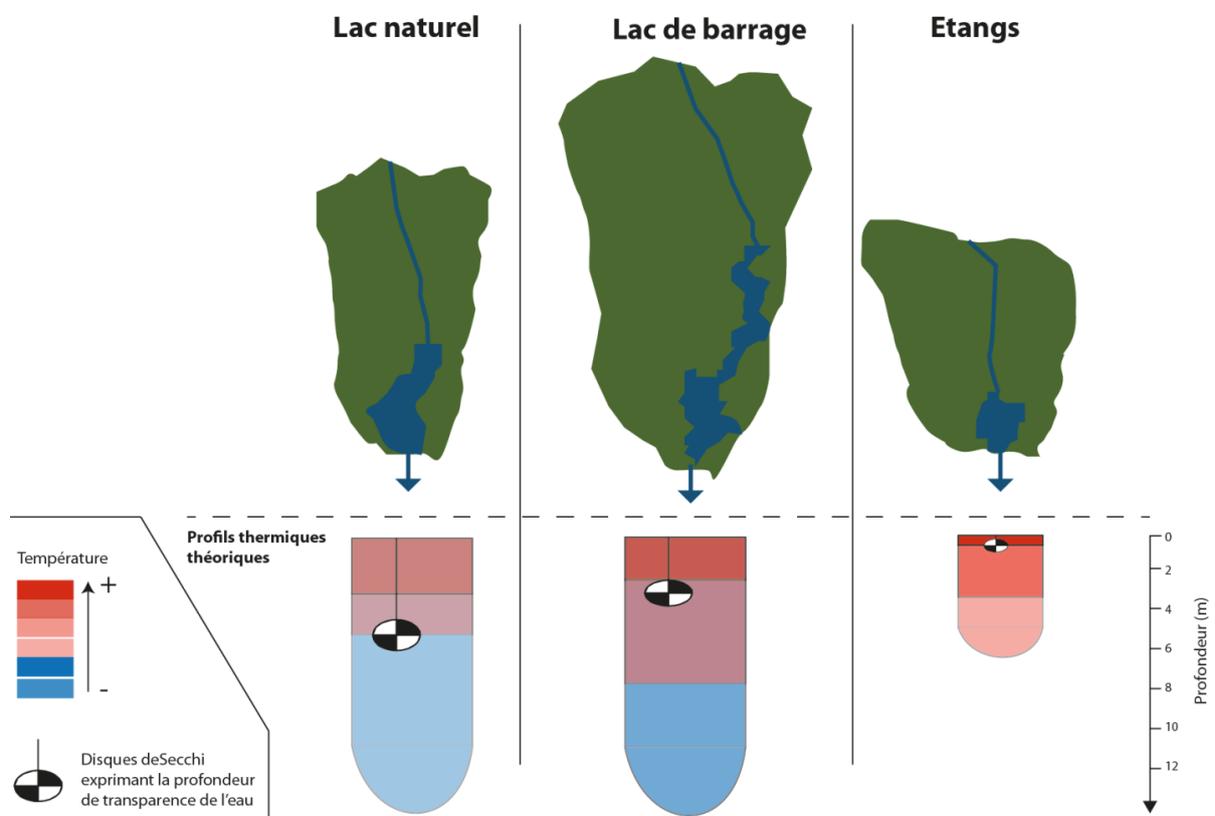


Figure 5: Comparaison des aires d'alimentation et fonctionnement thermique des différents plans d'eau (Hayes *et al.*, 2017, modifié et adapté)

Le lac n'est pas une zone tronquée de la mer, la mare ne correspond pas à la dynamique thermique de la partie supérieure de l'étang et, de fait, les étangs ne sont pas des épilimnions lacustres. La dissociation des différents plans d'eau n'est pas que le fait d'aspects sociétaux, économiques ou d'opposition entre une certaine naturalité, du moins à l'origine, et une artificialité. C'est la distinction entre des fonctionnements divers qui vont induire une réponse particulière du milieu. Un étang n'a pas une capacité de résilience

semblable à celle du lac face à un phénomène de pollution ou encore une réponse à des conditions météorologiques. L'absence de prise en compte de différence entre ces milieux pose des problèmes majeurs de gestion du plan d'eau et de son territoire amont et aval. L'assimilation de l'impact thermique aval d'un lac de barrage à celui d'un étang amène à des erreurs conséquentes en défaveur des plus petits plans d'eau. L'amélioration des connaissances respectives les concernant est nécessaire afin d'évaluer et non plus estimer leur fonction motrice sur le cours d'eau.

L'étang est alors défini dans notre étude géographique comme « ***un plan d'eau continental [artificiel] dont la taille intermédiaire permet une structuration régulière et temporaire des masses d'eau à l'échelle de quelques jours et une inertie se développant face à son encadrement immédiat (limnosystème de versant)*** » (Touchart, 2007, p.45).

Cette définition englobe les éléments morphologiques sans toutefois fixer de valeur limite et reste suffisamment large pour englober un maximum de plans d'eau. L'aspect artificiel a été rajouté ici à la définition de L. Touchart (2007) car il nous semble fondamental à l'échelle de la France, bien qu'il perde de sa cohérence lorsque l'on est à une échelle européenne ou mondiale. Enfin, cette définition s'attache particulièrement au fonctionnement interne du plan d'eau. Ce fonctionnement est l'élément déterminant de dissociation des masses d'eau.

1.4 Pourquoi étudier les étangs en limnologie ?

« Les étangs représentent en limnologie un stade intermédiaire entre l'expérience de laboratoire qui ne fait et ne veut faire intervenir que quelques facteurs essentiels et le lac dont la lenteur relative d'évolution ne permet pas toujours d'avoir le recul nécessaire pour une bonne interprétation des phénomènes »

(Dussart, 1966, p.240)

La limnologie s'est orientée dès son commencement vers les plans d'eau naturels et les lacs. L'objet étang est très peu étudié et son intérêt sera plus tardif. Son étude apporte pourtant un renouveau à la limnologie. De par sa petite taille, il est possible d'étudier les variations de ses paramètres physico-chimiques aux échelles verticales et horizontales avec une grande précision. L'objet étang a également un intérêt social lié à son artificialité et sa

localisation sur le cours d'eau. Par leur nombre, leurs usages et leur présence sur le réseau hydrographique, les étangs sont au cœur des problématiques environnementales. Par son emprise socio-économique forte et sa petite taille, l'objet étang présente un nouvel ensemble d'enjeux en limnologie, auxquels celle-ci répond encore trop peu. Cependant, des études de géographie physique sont désormais initiées à leur sujet, s'appuyant sur un contexte social et économique complexe. Les étangs au cœur des territoires de l'eau

L'objet étang se trouve au cœur de questions sociales, environnementales, juridiques et économiques. L'étude géographique de ces étangs permet d'englober l'ensemble de ces éléments, liés les uns aux autres.

La prise de position écosystémique de la réglementation européenne et française laisse prétendre que l'on peut revenir à une période antérieure, supposée présenter une qualité des écosystèmes meilleure que l'actuelle. Or, la présence de moulins, seuils ou étangs, répond ou a répondu à une demande économique et sociale à une période donnée. Cette approche sociale peut difficilement être mise de côté ou réduite à des perturbations. La place de l'homme doit être prise en compte et tenter d'être intégrée dans l'évaluation et la vision de notre environnement, soit la notion d'anthrosystème (Lévêque *et al.*, 2003). L'absence de cette vision socio-écosystémique centrée dans les notions de masse d'eau de la DCE pose problème alors que la prise de conscience du besoin des sciences sociales et humaines dans la gestion de l'eau est grandissante (P. Guettier, 2013⁶, C. Le Calvez, 2017). Bartout & Touchart (2018) proposent de coupler les approches sociales et environnementales pour les plans d'eau, au sein de la notion de territoire limnique, en complément de celles de territoires de l'eau. Certains auteurs travaillent également sur les bienfaits des milieux aquatiques anthropiques, dont la reconnaissance est faible, alors que l'intérêt de biodiversité des *anthropogenic refuges* (Chester & Robson, 2013) est fort.

Les territoires de l'eau sont perçus comme une « *réponse spatialisée à un besoin local par la mobilisation des savoirs, de pratiques et de techniques, en un temps t* » (Alexandre et Arrus, 2004⁷). Le bassin versant, outil de prédilection des hydrauliciens, semble souffrir de

⁶Semaine Mondiale de l'eau à Stockholm en septembre 2013 (P. Guettier, ouverture dans le livre écologie Politique, J.P. Pierron *et al.*, 2017).

⁷Cité par Bartout & Touchart, 2018

certains manquements, principalement par l'oubli de la notion de territoire, vue par Moine (2005) comme une acceptation sociale et une appropriation de l'espace par des groupes d'individus. Le rôle intégrateur de la société a son importance lors de la mise en place d'instructions sur un territoire, tel que le territoire de l'eau. Le territoire limnique, par l'ajout des plans d'eau, bien souvent oubliés, apporte de nouvelles connaissances et précisions sur des régions qui en sont largement pourvues. Ce dernier ne peut plus être considéré comme un simple agent perturbateur, mais l'attention doit être portée sur l'historique de ces pièces d'eau sociales, leur apport ainsi que les conséquences de leur disparition possible.

Les étangs présentent un intérêt grandissant lorsqu'ils sont groupés en régions d'étangs ou pondscapes (Boothby, 1997). L'élaboration de zones cohérentes de mise en place de gestions environnementales des étangs pourrait être un moyen cohérent de leur valorisation. La proposition de gestion à l'échelle des pondscapes semblerait justifiée et permet d'identifier des objectifs communs pour les étangs (Biggs *et al.*, 2016), mais également les cours d'eau qui en découlent. L'aménagement des étangs doit être perçu à une échelle cartographique plus petite que celle du plan d'eau unique, notamment pour améliorer la qualité de l'eau du cours d'eau aval. Les coûts importants imposés par ces pratiques nécessitent une réflexion globale sur l'analyse à l'échelle du bassin versant ou de régions d'étangs. La suppression d'un étang, ou sa mise en dérivation, alors qu'il est situé au cœur d'une succession d'étangs, aura un effet réduit voire négligeable.

Les tissus sociaux, économiques et historiques, alors rarement pris en compte dans les instances gouvernementales de l'eau (Bartout & Touchart, 2018), ont un besoin grandissant de valorisation. Le seul intérêt écosystémique ou biologique ne saurait répondre à une demande socio-économique locale, non intégrée dans les idéaux des différents acteurs.

Notre approche se veut légèrement différente afin de ne privilégier aucun milieu au préalable, qu'il soit lentique ou lotique. La présente étude se propose d'analyser et de comprendre le fonctionnement d'un étang en interne et également au sein d'un réseau hydrographique en le plaçant au centre de ce dernier. Les premiers questionnements portent sur les répercussions thermiques des étangs sur un réseau hydrographique. En réalité, en comparant des études thermiques sur les milieux limniques et cours d'eau, l'étang se rapproche-t-il plus d'un lac ou d'un cours d'eau ? Il est difficile de cerner réellement la

dynamique de ces espaces hybrides, dont la saisonnalité, la localisation, sa place dans le bassin versant et nombre d'autres éléments jouent un rôle majeur dans leur évolution. Or, cette connaissance s'avère fondamentale afin de mesurer le réel impact de ces entités présentes sur un cours d'eau, en comparaison avec leurs apports possibles et les conséquences d'une suppression d'un équilibre installé depuis des dizaines à des centaines d'années.



Photo 1: étangs effacés sur les bassins versants de la Zinsel du Nord (gauche) et de la Sauer (droite). Photo prise depuis l'ancienne chaussée (Q. Choffel, 2018)

1.4.1 L'objet étang dans les politiques et législations environnementales

1.4.1.1 La loi sur l'Eau et la DCE, socles politiques de gestion des étangs

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) de 2000 est le socle des principes de gestion liés aux masses d'eau en Europe. Elle définit le lac comme « *une masse d'eau intérieure de surface stagnante* », pouvant être artificielle : « *masse d'eau de surface créée par l'activité humaine* ». Dans ce texte, sont considérées comme masses d'eau tous les plans d'eau dont la superficie dépasse les 50 ha (Annexe II). Cette limite surfacique inférieure laisse planer un doute et une incompréhension sur un tel choix (Bartout, 2017). En France, 540 plans d'eau sont supérieurs à 50 ha, dont 44 étangs (Prats *et al.*, 2017) quand P. Bartout et L. Touchart dénombrent près de 250 000 étangs sur le territoire métropolitain (Bartout & Touchart, 2013). Les étangs ne sont pas définis dans l'ensemble des masses d'eau et appartiennent donc à un tronçon d'une masse d'eau « cours d'eau » (Wasson *et al.*, 2004). Ils doivent répondre aux mêmes exigences biologiques et physico-chimiques des cours d'eau, amenant une incompréhension et une difficulté d'interprétation. Le fondement principal de la DCE repose sur l'évaluation de l'état écologique et chimique des masses d'eau et la volonté de rétablir un « bon état » des masses d'eau sous une politique de résultats.

L'annexe V de la DCE inclut les températures dans les paramètres généraux de l'évaluation de la qualité des cours d'eau et des lacs. La fréquence de mesure de température minimale imposée est de 3 mois pour l'ensemble des masses d'eau. Cette fréquence minimale peut-elle réellement comprendre une dynamique thermique globale d'un cours d'eau ou d'un étang ? Le lac dimictique a une dynamique thermique saisonnière, dont la prise de mesure trimestrielle peut s'avérer cohérente, représentant les phases de mise en place de la stratification, de sa persistance puis de sa destruction. Cependant, les premières recherches sur la température en étang (Touchart, 2002, 2007, 2010, Folkard *et al.*, 2010) ont montré une évolution de la stratification à des échelles journalière à mensuelle durant la phase estivale. La prise de mesure quelques fois dans l'année ne permet pas des résultats cohérents sur les étangs. Elle devient également controversée pour les lacs, dont le besoin de connaissance des dynamiques à long terme ne peut s'appuyer sur cette fréquence de mesure (Prats *et al.*, 2018).

Pour les étangs situés sur cours d'eau, la notion de « continuité de la rivière » apparaît en premier en annexe du document Directive 2000/60/CE du Parlement Européen et du Conseil, lié à l'état des eaux de surface, dans la sous-partie « *paramètres hydromorphologiques soutenant les paramètres biologiques* » (Annexe V, p.34). L'application de la DCE à l'échelle française est introduite par la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) de 2006. Dans l'étude des liens entre les cours d'eau et les plans d'eau, cette dernière énonce le principe suivant : « *Une liste de cours d'eau, parties de cours d'eau ou canaux dans lesquels il est nécessaire d'assurer le transport suffisant des sédiments et la circulation des poissons migrateurs. Tout ouvrage doit y être géré, entretenu et équipé selon des règles définies par l'autorité administrative, en concertation avec le propriétaire ou, à défaut, l'exploitant.* ». La notion de continuité écologique et de barrage à l'écoulement et à la libre circulation des sédiments et espèces est, depuis lors, introduite et elle ne cesse d'être renforcée. En réalité, les premières questions sur la continuité écologique sont plus anciennes puisque dès 1865, une loi impose d'équiper les ouvrages problématiques d'échelles à poissons sur les cours d'eau classés par décrets (Germaine et Barraud, 2017). Cette loi a été mise de côté puis relancée par la loi Pêche de 1984 obligeant à un entretien constant des équipements pour la circulation des poissons sur les cours d'eau dits classés.

Le critère de continuité écologique est renforcé par l'élaboration de la Trame Verte et Bleue (TVB) du Grenelle de l'Environnement en 2007. L'objectif premier est de permettre une libre circulation des espèces, avant tout à l'échelle régionale avec la mise en place du Schéma Régional de Cohérence Ecologique. L'Etat est engagé à effacer les obstacles les plus problématiques à la migration des poissons (Germaine & Barraud, 2013). La continuité renforce l'idée d'un passage, depuis les années 2000, à une gestion écologique des cours d'eau et milieux aquatiques. Le contexte écologique renvoie à la notion de « nature » et l'ensemble des moyens mis en œuvre ont pour objectif de rendre au cours d'eau son état « naturel ». Cependant, toute la question est de définir cette notion de nature, soit le moment où le cours d'eau a été considéré en bon état. La perception de la nature est amenée à être différente selon les individus, pouvant largement différer de celle des textes de lois, apportant une augmentation des conflits locaux (Germain & Barraud, 2017). La recherche d'un retour à un état vierge du cours d'eau semble utopique « *De ce point de vue, évoquer des conditions stables de référence relève d'une conception des écosystèmes que l'on peut*

qualifier de « climacique », qui s'oppose à une conception plus adaptive où les perturbations passées tendent à influencer de façon irréversible leurs trajectoires et où l'Homme est partie prenante de cette dynamique. » (Bouleau & Pont, 2014, p.18). Cette approche très naturaliste oublie un acteur important de nos milieux : l'Homme. L'article de Lévêque n'est pas sans rappeler l'importance de la coévolution des systèmes naturels et sociaux au sein d'un même environnement, appelé « anthropocène » (Lévêque, 2004). Dès lors que l'aspect social est pris en considération, non pas comme un perturbateur constant mais bel et bien comme un élément du milieu, les questions d'états naturels ou de référence prennent fin (Bartout & Touchart, 2018).

1.4.1.2 La continuité écologique: de la destruction des étangs à sa contestation sociale locale

« Etant donné les incertitudes sur la restauration, la préservation de l'environnement, là où il existe et où il a coévolué avec la société, reste d'actualité. »

(Bouleau & Pont, 2014, p.20)

Les étangs sont au cœur d'une situation écologique et sociale complexe où leur place et leur influences positives et négatives sont peu connues. « *Le bilan [de l'application de la DCE] serait beaucoup plus réservé dans le cas des milieux lacustres et des eaux de transition (estuariers, milieu marin côtier) où la plus grande rareté des données biologiques disponibles et l'absence fréquente de développement d'indicateurs antérieurement à la DCE n'a pas encore permis une réelle harmonisation des évaluations.* » (Bouleau et Pont, 2014, p.13). C'est également vrai pour les étangs que l'on peut considérer comme des zones de transition non pas entre des milieux à degré de salinité distincts, mais comme un espace entre les milieux lotiques et lentiques. Ces espaces de transition souffrent d'une absence significative de données et de connaissance permettant la mise en place d'indicateurs et de moyens adaptés.

Le processus d'effacement d'ouvrages constitue un fait récent dont les retours d'expériences restent rares, et il existe une disparité forte entre la volonté locale et celle des instances gouvernementales. Les lacunes sont importantes sur les effets sociaux et économiques d'un effacement tandis que la validité scientifique des intérêts procurés est

débatte (Dufour *et al.*, 2017⁸). L'approche française de la protection des cours d'eau, réglementée par la LEMA et la Circulaire du 18 janvier 2013 sur le classement des cours d'eau favorise une approche biologique au détriment des notions patrimoniales, sociales et économiques. Le maintien d'une espèce emblématique est préféré à l'intérêt social et historique d'un plan d'eau recouvrant plusieurs activités de loisirs telles que la baignade, le tourisme et la pêche. La valeur écologique des retenues est assez peu mise en valeur (Oertli *et al.*, 2002, 2005, Williams *et al.*, 2003), ainsi que les avantages liés à la rétention des polluants (Banas, 2016) au maintien du débits d'eau et donc à la lutte contre les sécheresses (Lévêque, 2016). Enfin, l'aspect paysagé mis en avant par de nombreuses régions d'étangs est quant à lui également tombé dans l'oubli des textes réglementaires. Il reste pourtant au cœur des politiques globales de régions telles que le Limousin, la Brenne, les Dombes, le Sundgau ou encore la Sologne. Les étangs ont façonné un paysage d'agrément au fil des siècles, qui ne devrait pas être négligé dans les actions en faveur de la continuité écologique. Des géoroutes articulées autour des étangs existent dans certaines régions, comme dans le Sundgau où la route de la Carpe-frite permet la mise en valeur de ces petits plans d'eau et de leurs produits auprès des restaurateurs.

De nombreuses contestations naissent de ces mesures drastiques, parfois jugées violentes⁹. Lors d'une audition parlementaire de la Commission du développement durable du 23 novembre 2016, les chercheurs Jean-Paul Bravard et Guy Pustelnik se sont exprimés vis-à-vis de ces mesures de préservation d'une continuité écologique et sédimentaire. L'objectif de supprimer les petites entités tels que les moulins, seuils ou étangs est vivement critiqué eu égard aux grands barrages alors quasi épargnés. Pourtant, les études d'impacts utilisés pour valoriser les besoins de la continuité sédimentaire sont, quant à eux issus, des effets des grands barrages, directement extrapolés aux étangs et seuils. Or, un étang d'un volume de quelques milliers de m³ peut-il réellement être comparé aux grands barrages comptant plusieurs millions de m³ ? L'impact thermique, sa distance aval et sa mesure sont-ils les mêmes, ou, du moins, sont-ils proportionnés en fonction des mêmes règles ? La

⁸Cité par Barraud & Germaine, 2017

⁹Communication orale, réunion comité de pilotage, Baerenthal, 15/11/2017, suite à l'envoi de la lettre au préfet de 5 maires afin de contester les mesures « violentes » et « brutales » de la mise en place de la continuité écologique. Développement de réseaux et moratoires contestant la mise en place de la continuité écologique.

Pleurs du maire de Peyrelevade lorsqu'il a appris que son étang allait être détruit au niveau de la Vienne Amont (Comm. Or. Pascal Bartout).

réponse paraît évidente, bien qu'encore peu étudiée, mais ne semble pas choquer bon nombre de décideurs. Enfin, les questions d'échelles de mise en place des politiques publiques semblent primordiales. Est-ce que l'approche du global vers le local est toujours pertinente ? Ne vaudrait-il pas mieux privilégier le cas par cas (Lévêque, 2016) et en tirer une conclusion pour pouvoir s'approprier le local avant d'immerger vers le global (Bartout & Touchart, 2015) ? L'approche du local au global permet de mieux intégrer les questions de l'appropriation sociale (Lévêque, 2016) des sociétés et de répondre à la problématique environnement sur un territoire différent, tel le territoire limnique proposé par Bartout & Touchart (2018).

La question de territoires cohérents pour la gestion des milieux aquatiques est éminemment géographique. Elle demande de repositionner le chercheur et le gestionnaire dans un niveau local qui lui convient et de replacer les éléments environnementaux dans un système cohérent et équilibré. La place des cours d'eau largement dominante dans la pensée française à l'échelle nationale, en comparaison de celle des plans d'eau, ne permet pas toujours d'opter pour une approche objective. Certaines régions sont composées de milliers d'étangs, la plupart localisés sur le chevelu hydrographique de tête de bassin. Leur nombre important peut entraîner le fait que le linéaire de cours d'eau, soit le système lotique, est réduit à quelques mètres ou centaines de mètres entre deux étangs. Ces situations, que l'on peut retrouver dans les régions d'étangs, posent la question de la pertinence de l'approche centrée sur le cours d'eau. Dans ces cas-là, est-ce qu'une approche différente, intégrant les plans d'eau au même niveau que les cours d'eau, ne serait pas plus explicite et intégratrice de la réalité environnementale de ces milieux ?

Dans une note technique récente¹⁰, le gouvernement souhaite « apaiser » les conflits liés à une incompréhension ou une incohérence d'action de la continuité écologique à l'échelle locale. Il semblerait donc nécessaire d'opter pour une approche intégratrice des besoins locaux où les étangs mais aussi les seuils et les moulins doivent avoir une place centrale dans l'étude du continuum cours d'eau plan d'eau.

¹⁰Note technique du Ministère de la transition écologique et solidaire, 30 avril 2019, relative à la mise en œuvre du plan d'action pour une politique apaisée de la restauration de la continuité écologique. <http://circulaires.legifrance.gouv.fr/index.php?action=afficherCirculaire&hit=1&retourAccueil=1&r=44619>

1.4.2 Approche limnocentrée des liens cours d'eau/plans d'eau

L'étude des étangs permet de placer les échanges entre cours d'eau et plan d'eau de barrage au cœur des études hydrologiques à l'échelle des têtes de bassin, réunissant les étangs et les petits cours d'eau. Sur ces milieux, une approche des échanges thermiques centrée sur l'étang, récepteur des conditions amont et moteur des caractéristiques aval, ouvre de nouvelles perspectives de recherches.

L'approche écosystémique dicte l'ensemble des règles et éléments à étudier dans le cadre de l'évaluation du « bon état » des eaux présent dans la Directive Cadre sur l'Eau de 2000. Cette approche favorise la biocénose et est particulièrement centrée sur le biotique (Rougerie, 1996). Elle est une constante dans l'ensemble des grandes études limnologiques, depuis Thienemann (1925), renforcée par la problématique de l'eutrophisation, touchant plus fortement les plans d'eau que les cours d'eau par leur forte stagnation des eaux (Touchart & Bartout, 2018). La limnologie, initialement définie comme la Géographie des eaux des lacs (Forel, 1892) a perdu son sens au profit d'études biologique et écosystémique. Or, l'écosystème est un système ouvert étudiant les flux mais il hiérarchise en faveur de la biocénose aux dépens du biotope, ne tient pas compte des échelles spatiales et considère l'homme uniquement comme un perturbateur. De fait, l'approche favorisée de mesure de qualité des eaux est concentrée sur les cours d'eau en Europe occidentale. Cette vision fluvio-centrée rejette les eaux stagnantes dans l'intégration de l'analyse complète du milieu (Touchart, 2017, Williams *et al.*, 2003, Oertli *et al.*, 2009). Dans la vision du système fluvial, le plan d'eau est perçu comme une rupture de pente, un accident topographique et sédimentaire. Lorsque les études se portent sur les lacs, ces derniers sont bien souvent situés en bout de course, exutoire de la zone d'étude. Or, les plans d'eau sont des récepteurs d'un amont mais également moteurs de leur aval. Par les caractéristiques de leur bassin versant, ils sont les récepteurs de nombreux éléments et de conditions physico-chimiques particulières. Par leur dynamique interne et leur capacité à se stratifier ou non, par l'apport d'une dimension spatiale latérale particulière, les plans d'eau sont aussi moteurs du cours d'eau aval. Laurent Touchart suggère qu'il « conviendrait d'apporter d'autres espaces en aval, à mieux définir que le seul émissaire » (Touchart & Bartout, 2018). Le bassin versant, soit la partie amont, est facilement cartographiable, alors que l'aval d'un plan d'eau est une limite floue. Quel aval pour quel élément choisi ? Quels types de perturbation ont un impact sur

quelle distance ? Et pourtant, il se révélerait intéressant de connaître davantage ce milieu influencé par le plan d'eau.

D'un point de vue thermique, quelques études ont positionné le plan d'eau au centre ou à l'amont d'un système fluvial, généralement pour des lacs (Walker *et al.*, 1978, Lesard & Hayes, 2003, Savy, 2006) et quelque peu pour les étangs ou petits plans d'eau (Touchart, 2001). Les plages de valeurs sont extrêmement différentes, allant de plusieurs centaines de kilomètres en lac, à quelques kilomètres en étang, généralement moins d'une dizaine. La limite aval, en ce qui concerne uniquement la température, est mouvante et assez floue, dépendant principalement du volume d'eau mais aussi de la profondeur de sortie d'eau (fond ou surface), de la présence d'autres perturbations thermiques sur le linéaire etc.

Il en ressort une forte complexité à délimiter ces espaces influencés par le plan d'eau. Le plan d'eau ne peut pas être intégré uniquement comme perturbateur du système lotique, mais bien comme un élément central à part entière, influencé par les caractéristiques amont et influençant tout un système aval. Pour les plans d'eau coupés du réseau hydrographique, soit sans échanges hydrologiques directs la plupart du temps, leur reconnaissance est souvent faible. En Pologne, des chercheurs ont émis l'hypothèse que les étangs polonais sont considérés comme presque invisibles. L'idée qu'ils n'ont pas de lien avec le réseau hydrographique, que leurs liens avec la nappe sont méconnus, amène à la comparaison de ces petits plans d'eau isolés à des terrains vagues (« wasteland », Golus et Bajkiewicz-Grabowska, 2017, p.11). Les étangs ne sont généralement pas vus comme faisant partie du réseau hydrographique mais sont considérés uniquement comme des dépressions inondées (Pienkowski, 2006). La place de l'étang est liée au manque de connaissance de ce milieu aquatique, parfois considéré comme une zone humide (Convention de Ramsar, 1986), parfois comme un petit lac (J. Loup, 1974), dont les connaissances du fonctionnement hydrologique, thermique et les relations avec les autres pièces hydrologiques restent floues.

Pour les lacs, l'acceptation est plus forte, car la sensation de naturalité induit une plus grande tolérance vis-à-vis du milieu. Qu'en est-il des étangs et donc de la prise en compte anthropologique de notre environnement, où l'homme joue maintenant un rôle primordial ?

A l'inverse de la France, certains pays ont une approche limnocentrée, liée principalement à la présence en grand nombre de lacs naturels. Ce dernier adjectif jouant pour beaucoup dans l'acceptation de l'oubli du cours d'eau au profit du lac. En Pologne, dans la région de Warmie où les grands lacs issus de la dernière déglaciation sont dominants, la majorité des études et projets sont tournés vers les milieux lenticques. Le lac de Kortowo fut un pionnier dans les tentatives de réhabilitation et d'amélioration de la qualité de l'eau des lacs au début des années 1950 (Mientki & Teodorowicz, 1996, Dunalska, 2002). Il fut un exemple pour nombre d'autres lacs naturels des environs de la ville d'Olsztyn, où des aérateurs ont été installés à la fin des années 1970. L'approche limnocentrée ne se limite pas à ces espaces lenticques naturels, puisque les étangs et réservoirs sont également nombreux dans la région. Ils font l'objet de recherches sur des effets positifs pour le milieu aval, et notamment la rétention de polluants des étangs situés en amont d'un lac, afin de préserver un bon état de ce dernier¹¹. Plus à l'Est, en Russie, l'approche limnocentrée est également privilégiée en certaines situations, notamment liées à la température de l'eau. Les lacs de barrages situés sur l'Angara ont fait l'objet d'études suite à la fonte rapide du pergélisol en aval. « *Le réservoir de Bratsk a fortement perturbé la stratification hydrochimique des aquifères karstiques de la plateforme, à cause du déversement des eaux en surface, ce qui pose des problèmes* » (Pulina, 2005, p.65). L'approche limnocentrée des enjeux thermiques permet d'analyser le milieu dans son ensemble, plaçant le plan d'eau au centre de l'étude et non pas comme un unique réceptacle ou un simple déversoir de calories.

Avant de connaître les influences d'un étang sur un cours d'eau il semble intéressant d'appréhender le fonctionnement interne des étangs au sein d'un continuum cours d'eau-plan d'eau- cours d'eau. Ces milieux sont-ils influencés par les conditions atmosphériques ou par la présence d'un cours d'eau ? Leur dynamique se rapproche-t-elle d'un lac ou est-elle plus proche de celle d'un cours d'eau ?

L'ensemble de ces questions mérite une attention particulière au moment où la préservation de ces plans d'eau est nécessaire. Il semble primordial d'assurer la réussite des projets de gestion de la ressource en eau, de sa qualité à sa quantité. La prise en compte du fonctionnement de l'étang au sein d'un territoire limnique permet de privilégier des secteurs

¹¹Thèse en cours à l'université de Warmia y Mansirua, Izabella Ryniec

de gestion plus efficace lors de l'aménagement ou la suppression de ces pièces d'eau. Certains plans d'eau ont de nombreux effets néfastes là où d'autres représentent un intérêt vital pour l'écosystème lentique et lotique. L'approche limnocentrée apporte un point de vue de l'étang comme un système faisant parti de l'écosystème aquatique et pas seulement comme un perturbateur du milieu. L'approche de l'étang au centre des territoires de l'eau est nécessaire à la prise en compte, la mesure et à l'évaluation des impacts et bénéfices réels de ces milieux aquatiques sur leur environnement.

Pour appliquer à notre recherche la démarche limnocentrée qui nous semble opportune, il conviendra de choisir dans le chapitre suivant de véritables régions d'étangs destinées à former des territoires limniques, au sein desquels on aura pris soin de sélectionner quelques plans d'eau particuliers dont la représentativité sera discutée.

Chapitre 2 : Localisation des terrains d'études au cœur de régions d'étangs

2.1 Géographique des étangs: une présence majeure de petits plans d'eau dans les têtes de bassin

2.1.1 La localisation des étangs en régions d'étangs

Les derniers inventaires, notamment de P. Bartout et L. Touchart (2013), mettent en avant la présence sur le territoire français métropolitain de plus de 550 000 plans d'eau de plus de 1 are. La quasi-totalité de ces plans d'eau sont d'origine artificielle. Leur localisation n'est pas homogène sur le territoire, certaines zones étant fortement concentrées en plans d'eau, et d'autres en étant dépourvues.

Les étangs sont majoritairement concentrés dans ce que l'on peut appeler des régions d'étangs, sur le territoire français métropolitain. Ces régions sont largement présentes dans la moitié septentrionale de la France et plus précisément la partie centrale et ouest du pays (Figure 6). Les petits plans d'eau forment un groupement conséquent dans certains secteurs dont les concentrations sont très élevées, comme en Brenne, Dombes, Sologne pour les plus connues ou encore dans le Sundgau, le Pays de Bitche, la Woëvre ou le Limousin et les Pays de la Loire. Dans ces régions, le nombre d'étangs dépasse régulièrement le millier et sont caractérisés par un historique socio-économique particulier. Qu'en est-il de la gestion de ces territoires dont la multitude d'étangs impose une considération et une prise en compte de ces milieux lenticques dans leur ensemble ? Les approches traditionnellement orientées sur le cours d'eau peuvent être remises en question dans un environnement où les étangs se succèdent sans laisser place au retour d'un espace aval à une dynamique semblable à celle du cours d'eau.

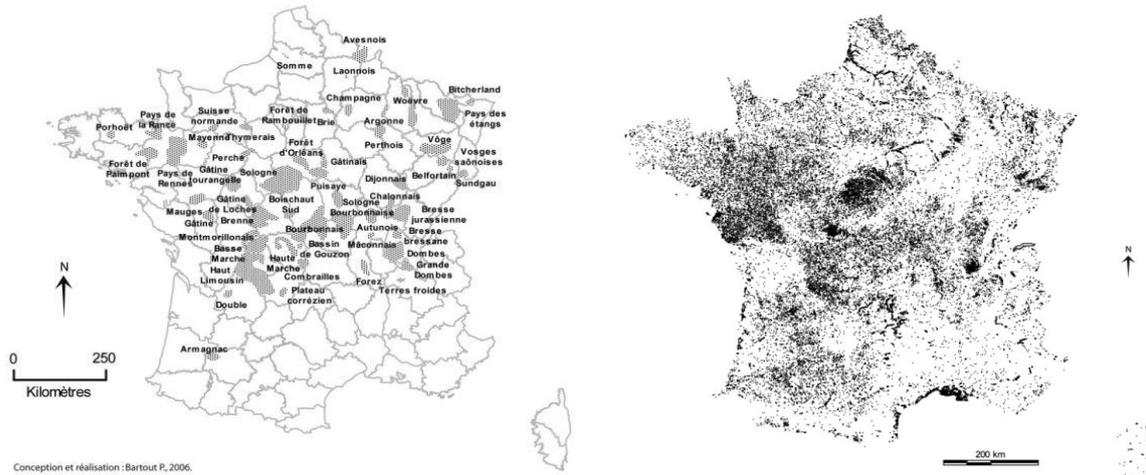


Figure 6: Cartes des régions d'étangs (gauche) et de la localisation des étangs (droite) sur le territoire de la France métropolitaine (Bartout et Touchart, 2013)

Des étangs caractéristiques de leur région d'appartenance

La plupart de ces régions sont composées de plusieurs milliers d'étangs, avec des concentrations localement très élevées, où la superficie cumulée des étangs dépasse celle du linéaire de cours d'eau. Ces régions possèdent une majorité d'étangs situés sur le réseau hydrographique, telles celles situées aux abords des massifs anciens comme dans les bocages limousins ou bourbonnais, sur les rebords des Vosges occidentales (la Vôge) ou septentrionales (Vosges du Nord- Pays de Bitche), ainsi qu'en Mayenne et dans le Pays de Rennes ou celles des plaines argileuses de la Brenne, de la Woëvre ou de la Sologne. En fonction de leur position au sein du bassin versant, de leur alimentation en eau ainsi que de leurs usages, les étangs vont avoir des morphologies différentes. Dans les vallées encaissées, les étangs sont plus étroits et profonds, avec des profondeurs maximales dépassant les 2 à 3 m. Les volumes d'eau sont conséquents et leur forme est principalement allongée dans le sens de la vallée. En plaine, les formes sont plus variées, non limitées par les contraintes environnantes. On trouve des étangs aux formes simples, plus rondes ou carrées, à la profondeur maximale réduite, en général inférieure à 1,5 m et au faible volume d'eau lorsqu'ils sont isolés du réseau hydrographique. Les étangs de plaine alimentés par des cours d'eau relativement conséquents ont des superficies élevées à l'image des grands étangs lorrains tels l'étang du Lindre.

Cette brève description des morphologies d'étangs englobe les plus grandes généralités sans nier les particularités locales souvent fortes. Les étangs peuvent être

caractérisés par leur région d'origine, les étangs limousins sont profonds quand ceux de Brenne sont pelliculaires, bien qu'il existe autant de faciès d'étangs différents au sein d'une même région qu'entre les régions.

Le poids morphologique de l'activité originelle de l'étang

La prise en compte d'une logique géographique de morphologie des étangs liée à leur position, à la géologie et à la topographie ne peut nier l'action anthropique à l'origine de l'étang. En fonction des usages premiers, la morphologie de l'étang va être différente. Ceux construits pour la force motrice sont généralement profonds et de faible superficie, répartis en cascade sur le cours d'eau, tandis que ceux pour la pisciculture sont peu profonds afin d'augmenter la productivité. Les étangs récréatifs sont généralement de forme simple alors que ceux pour charrier le bois des régions boisées vers la ville sont petits et se succèdent sur le cours d'eau pour assurer un débit suffisant (Mathis & Mathis, 2016).

La politique de gestion est la même pour ces pièces d'eau stagnantes que pour les régions partiellement ou totalement dépourvues d'étangs. La logique centrée sur le cours d'eau est appliquée par défaut aux régions d'étangs, tandis que le linéaire cours d'eau est parfois inférieur à la surface occupée par les étangs. Dans ces régions, les logiques de gestion pourraient s'appuyer sur les particularités du territoire hydrologique en fonction du nombre et du type d'étangs, selon sa morphologie et ses usages. Les éléments de mesure du bon état des masses d'eau repose uniquement sur le critère de cours d'eau, y compris en étang, apportant des résultats biaisés dans les régions à forte densité d'étang (Bartout, 2015).

2.1.2 Les têtes de bassin, des milieux privilégiés à la présence d'étangs

La partie amont des bassins versants abrite un réseau hydrographique dense, composé majoritairement de petits ruisseaux, souvent à écoulement intermittent, avant que leur jonction mène à de plus grandes rivières. Dans ces espaces naissent et s'épanouissent les cours d'eau au travers de zones humides et d'étangs. Bien que difficiles à border, ils attirent une attention de plus en plus forte de la communauté scientifique jusque-là focalisée sur les parties aval et notamment les grands fleuves. Une des raisons majeures reste la difficulté à instrumentaliser ces milieux à évolution rapide et dont les faibles débits et leur intermittence n'apportent pas la sûreté et la facilité des zones à l'aval. Ils restent peu connus

et méritent un approfondissement de leurs connaissances diverses et variées (Bishop *et al.*, 2008) dans le rôle des étangs dans ces milieux.

2.1.2.1 Description des têtes de bassin

En 1986, Marcel Roche évoque en français le terme de tête de bassin qui se définit ainsi : « *La tête de bassin est la partie la plus haute du bassin où naissent les principaux affluents et la rivière principale* » (Lhéritier, 2012). Pour l'auteur, les têtes de bassins sont les zones en amont où se multiplient les petits ruisseaux avant de donner naissance, par leur confluence, à un cours d'eau caractéristique avec un débit plus important. L'emprise spatiale de ces milieux est difficile à délimiter en l'absence de limites plus strictes et distinctives.

Nombre de définitions se sont suivies, apportant des précisions supplémentaires à la délimitation de ces espaces. La définition du pôle relais zones humides intérieures, « *zone de source et zone générant l'écoulement, puis le cours d'eau : zone incluant les ruisseaux d'ordre 1, 2, voire 3* » (Touchart, 2006) regroupe l'ensemble des éléments dont les notions de « zone de production ou d'érosion » reprises par Alain Giret (2007, p.104). L'intégration du rang de Strahler dans la définition est semblable aux approches anglo-saxonnes (Meyer *et al.*, 2003) et reste à l'heure actuelle le fondement de délimitation des zones de tête de bassin. Elle permet d'établir des limites strictes, facilement lisibles à l'aide d'une source cartographique, sans nécessiter un travail d'observation *in situ*. La délimitation de ces espaces par le rang de Strahler a connu un succès lié à la facilité de lisibilité et de délimitation.

D'autres seuils et critères permettent ou ont permis la définition et la délimitation de ces milieux. La température de l'eau a longtemps été un élément de délimitation entre un espace amont et aval. Ricker (1934, cité par Lhéritier, 2012, p.34) utilise la température maximale pour délimiter deux espaces : les « *spring creeks* » et les « *drainages creeks* ». Le premier des deux espaces a une température inférieure à 20°C, utilisée comme seuil pour la tête de bassin. La température est un élément fondamental pour ces espaces, son influence agit sur de nombreux éléments dont la décomposition des litières et plus particulièrement sa vitesse (Four, 2017). Le maintien de la température dans une gamme optimale stimule l'activité des micro-organismes (Berggren *et al.*, 2010, Ferreira & Chauvet, 2011, Martinez *et al.*, 2014).

A partir des années 1990, une fois les grands cours d'eau bien étudiés et suivis, un nombre croissant de chercheurs remonte le fleuve vers les ruisseaux de tête de bassin. En France, l'établissement de contrats de rivière à partir de la Circulaire ministérielle du 5 février 1981 (Martin-Place, 2002, cité par Morandi *et al.*, 2014), a porté l'attention vers les petits cours d'eau en amont. Les programmes d'interventions des Agences de l'eau s'éloignent d'une politique orientée vers les pollutions, notamment industrielles, et les questions hydrauliques concernant les grands fleuves à partir des années 1980. Le 5^{ème} programme d'intervention des Agences de l'Eau (1987-1991) place « *la mise en valeur piscicole et touristique comme la dimension esthétique [] les principaux indicateurs d'un nouveau rapport au cours d'eau, devenu enjeu et placé au même plan que les questions hydrauliques et écologiques* » (Morandi *et al.*, 2014, p.8). L'évolution est à la fois thématique, devenant plus englobante, et spatiale avec l'intégration des parties amont et aval des cours d'eau. En 2003, un groupe de 11 chercheurs des Etats-Unis d'Amérique se réunit autour d'un ouvrage sur les têtes de bassin intitulé *Where rivers are born : The scientific imperative for defending small streams and wetlands* déplaçant l'attention vers ces espaces oubliés. Les études mettent en avant que les données portant sur le nombre et la localisation des petits cours d'eau, mises à disposition du public et de la communauté scientifique, sont insuffisantes et incomplètes. De nombreux trésors hydrologiques ou biologiques se cacheraient dans ces milieux pratiquement inconnus, le travail de bureau en télédétection ou à partir de tout autre moyen topographique ne semblant pas d'une précision suffisante, ou semblant trop conséquent pour en faire ressortir la totalité des pièces d'eau qui ornent ce paysage.

Les zones amont drainent un chevelu dense de petits cours d'eau, que la faiblesse de leur débit rend vulnérable aux modifications diverses, dont celles de leurs paramètres physico-chimiques. Ils sont fortement influencés par leur bassin versant et ses caractéristiques (Alexander *et al.*, 2007, cité par Gaillard, 2014). L'occupation du sol, la géologie et la topographie ont un rôle sur la composition physico-chimique, le débit et la biologie de ces milieux. Toute modification du milieu entraîne une répercussion rapide sur les cours d'eau et zones humides qui occupent l'espace de tête de bassin. Le bon fonctionnement de ces milieux est essentiel à l'ensemble du réseau hydrographique, de l'amont à l'aval. La forte concentration de zones humides et de cours d'eau fait des têtes de bassin une zone de forte capacité de filtration de l'eau et de rétention des nutriments (Banas,

2007) propice au bon état des cours d'eau. Le temps de séjour important des milieux aquatiques, en comparaison à celui des cours d'eau, est un paramètre déterminant de leur capacité à atténuer les pollutions par les entrants (Stehle *et al.*, 2011, cité par Gaillard, 2014). Du fait de sa localisation en amont, le chevelu hydrographique de tête de bassin influence la qualité et la quantité d'eau déversée vers l'aval et les grands cours d'eau. La tête de bassin est motrice de l'aval et demande donc d'avoir un bon fonctionnement et une qualité correcte.



Photo 2: Exemples de cours d'eau de tête de bassin (Affluents de la Zinsel du Nord, Q. Choffel, 2018)

Les étangs font partis intégrants de ces milieux amont, peu connus des chercheurs et du grand public. Alors que les grands lacs sont largement visibles et ouverts au public, les étangs sont souvent dans des milieux fermés dont l'accès peut être restreint. Malgré leur faible superficie, leur présence sur des cours d'eau à débit très faibles leur apporte une importance relative forte.

2.1.2.2 Les têtes de bassin, un milieu menacé par la présence d'étangs ?

Les cours d'eau sont fortement anthropisés et les espaces de têtes de bassin souffrent de plusieurs types de pressions, provoquant des altérations multiples de leur structure et de leur fonctionnement. L'agriculture intensive est fortement présente sur ces espaces, apportant une source majeure de stress dont les effets directs ou indirects sont visibles (Four, 2017). Parmi les effets directs, nous pouvons citer l'apport d'engrais, de pesticides et de fertilisants organiques au sein du plan d'eau. Ces apports favorisent une eutrophisation rapide des zones humides et notamment des étangs. Les effets indirects peuvent avoir lieu suite à la suppression de la ripisylve ou au recalibrage du cours d'eau, empêchant son évolution morphologique latérale. Ces modifications peuvent entraîner des impacts conséquents sur les milieux aquatiques de tête de bassin, sur l'eutrophisation, les habitats ou encore sur l'augmentation de la température de l'eau.

Les enjeux sur les têtes de bassin, appliqués aux espaces ruraux en règle générale, sont multiples. Les têtes de bassin abritent une grande majorité de plans d'eau. Ces espaces à la marge, dans des zones agricoles ou forestières, ont longtemps été valorisés par des moines qui y ont implanté de nombreux étangs à partir du XI^{ème} siècle. Les premières importantes créations d'étangs sont liées aux pratiques religieuses du Jeûne, répondant à la demande en poisson conséquente (Bartout, 2015, Mathis & Mathis, 2016). En Limousin, P. Bartout (2007) a recensé que la grande majorité des étangs sont situés dans les têtes de bassin. En prenant en compte les cours d'eau de rang inférieur ou égal à 2 d'après l'ordination de Strahler, 93,6 % des étangs sont situés en tête de bassin. 80 % sont situés sur des cours d'eau de rang 1 voire même sur des cours d'eau temporaires (rang 0).

C'est sur ces petits cours d'eau à débit très faible que les étangs ont trouvé leur place au cours du temps, afin de répondre à une demande sociale et économique.

2.1.3 Les diverses influences des étangs sur le cours d'eau

2.1.3.1 Les effets bénéfiques des étangs

Les étangs sont reconnus pour être de véritables réservoirs de biodiversité, parmi les plus importants de la planète (Davies *et al.*, 2008, Chester & Robson, 2013, Oertli & Frossard, 2013). La forte productivité de ces milieux, ainsi que les échanges fréquents avec le milieu environnant et la végétation en font des espaces de forte diversité. De très nombreuses

espèces inscrites sur Liste Rouge (IUCN Red List) sont dépendantes, au moins durant une partie de leur vie, du milieu stagnante. Classés comme zones humides dans le sens de la convention de Ramsar, certains d'entre eux font l'objet d'une zone de protection Ramsar pour leur importance dans la biodiversité (*Etangs de la Champagne humide, Etang du Lindre, la Brenne, étangs de la Petite Woëvre*). Un grand nombre porte également une étiquette Natura 2000, permettant la sauvegarde d'espèces à fort intérêt écologique ou en voie de disparition, ou sont localisés dans des réserves naturelles (Réserves Naturelles Nationales de Chérine en Brenne, de l'étang de Landes, de l'étang de la Mazière, de l'étang Saint-Ladre, etc.). Dans un contexte de changement climatique, la ressource en eau se trouve de plus en plus contrainte face à des événements exceptionnels récurrents ces dernières années (Céréghino *et al.*, 2013, La Jeunesse & Quevauviller, 2016). Lors de phases de sécheresse, il est reconnu que les étangs permettent de maintenir un débit d'étiage et d'assurer ainsi une gestion des besoins en eau à l'échelle du bassin versant. Lors de fortes sécheresses hydrologiques, une gestion des étangs est parfois effectuée, pour ceux bénéficiant d'un système de vidange, afin d'alimenter l'aval du cours d'eau de façon continue. Ces dispositifs sont mis en place lors de prélèvement en eau potable par exemple ou de besoin de maintien d'un débit d'étiage sur les cours d'eau.

Depuis quelques années, des études mettent en évidence la capacité d'épuration des étangs (Banas, 2010), améliorant la qualité de l'eau pour certains composants, avant sa restitution dans le cours d'eau. En milieu agricole, il a été démontré que les étangs ont une capacité à stocker les polluants et notamment les pesticides du bassin versant, limitant leur rejet dans le cours d'eau aval (Gaillard *et al.*, 2016a, 2016b). La rétention de phosphore par l'étang est également un élément important. Yin et Shan (2001) révèlent que 85,7 % du phosphore est retenu dans un système composé de plusieurs étangs en zone agricole (Fairchild & Velinsky, 2006). Les étangs fournissent d'autres services écosystémiques tels que la régulation des crues, le stockage des eaux pluviales en milieu urbain (Takamura, 2012) ou encore la diminution possible de l'effet de réchauffement urbain (« *heat islands* ») (Coutts *et al.*, 2013). Un aspect bien souvent laissé de côté dans l'étude écosystémique des étangs est la capacité de ces milieux à délivrer des bénéfices sociaux et culturels. Les étangs sont au cœur d'un besoin social ou d'une demande de Loisir, détente, sport ou d'aspect plus familial. Les étangs ont depuis longtemps servi de modèle aux peintres, le tableau le plus connu

restant probablement les Nympheas de Claude Monet (1905, musée des Beaux-Arts, Boston) ou encore Auguste Renoir avec les tableaux de La grenouillère (1869, Nationalmuseum, Stockholm) et la Yole (1875, National Gallery, Londres). Les milieux stagnants ont la capacité à améliorer les conditions physiques et mentales du bien être humain (Lundy & Wade, 2011). Cette composante n'est pas insignifiante, notamment en milieu urbain où la pression et la dégradation des conditions de vie sont de plus en plus fortes.

2.1.3.2 Les effets négatifs des étangs barrant un cours d'eau

De nombreux aspects des milieux stagnants sont positifs, mais il demeure cependant des fonctionnements jugés négatifs lorsque l'on choisit une approche basée sur le cours d'eau ou sur un état antérieur à la construction de l'étang. La création d'une chaussée barrant un cours d'eau modifie son état initial et engendre des impacts qui peuvent être continus, saisonniers ou ponctuels.

En ce qui concerne les impacts ponctuels, la vidange, lorsque celle-ci n'est pas correctement assurée, crée un apport excessif de matière organique au cours d'eau. Cette pratique piscicole peut être de courte durée (quelques jours) ou durer une année ou plus, généralement liée à une mise en assec pour l'exploitation agricole de la parcelle. Elle est courante dans certaines régions d'étangs à vocation piscicole telles que la Dombes ou la Brenne. Les vidanges peuvent avoir un impact important sur les plantes aquatiques (Oertli & Frossard, 2013) ainsi que sur le cours d'eau aval (Banas, 2010), principalement lié à une mauvaise gestion. L'effet de chasse de l'eau et des sédiments peut combler des cours d'eau aval s'il s'avère trop brutal, ou encore modifier sa géomorphologie. Ce processus est généralement rare à l'échelle de la vie du plan d'eau, bien souvent inexistant de nos jours, excepté dans certaines régions d'étangs où cette pratique perdure (dans les Dombes par exemple).

A une échelle de temps plus longue, la création d'un plan d'eau modifie la communauté d'espèces existantes par la création d'un nouvel habitat. Les espèces lotiques, préférant les conditions présentes en rivières, peuvent être remplacées ou du moins cohabiter avec des espèces lentiques (Fairchild & Velinski, 2006, Lessard & Hayes, 2003). Ces modifications sont principalement dues à la perturbation de l'alimentation de la colonne d'eau, dont l'aspect horizontal est majoritaire en cours d'eau, de l'amont à l'aval, tandis que les relations verticales sont dominantes en plan d'eau. La température de l'eau joue

également un rôle dans la répartition des espèces entre les milieux. Dans les eaux stagnantes, les espèces thermophiles sont favorisées au profit d'autres. La fragmentation de l'habitat par la température pose des problèmes aux autorités locales bien que l'on ne connaisse encore que peu les distances et zones d'influences de ces étangs (Brooker, 1981, Lessard & Hayes, 2003, Touchart, 2007). La fragmentation du milieu peut également être perçue comme essentielle pour la migration de certaines espèces (Brooker, 1981, Ward & Stanford, 1987). Une modification, et notamment une augmentation de la température, perturbe l'habitat et la population du milieu. D'après Lessard et Hayes (2003), le coefficient de Pearson entre la température de l'eau et le peuplement piscicole est de -0,66, soit le plus élevé des paramètres étudiés. Dans cette même étude, l'impact des barrages a été mis en avant comme un modificateur de la population piscicole. Cependant, alors que la population de truites dont les brook trout (*Salvelinus fontinalis*) est en nette diminution en aval de petits barrages, la richesse piscicole quant à elle, augmente en ce lieu.

Les différents impacts des plans d'eau sur les cours d'eau aval sont liés à la morphologie, la localisation, le volume et le temps de résidence des eaux des étangs. Nous constatons un manque d'études précises sur ce sujet. Les étangs sont depuis peu visés par les politiques publiques, en lien avec la question de la continuité écologique et sédimentaire ainsi que la problématique de pollution, qu'elle soit chimique ou thermique. Cette approche récente a été mise en avant dans l'application française de la DCE 2000, montrant l'étang comme un obstacle à contourner ou à supprimer. Avant la proposition de suppression du milieu stagnant, des préconisations sont faites sur le type de sortie d'eau pouvant limiter l'impact sur le milieu aval.

2.1.3.3 Les types de sorties d'eau en étang et leurs influences thermiques sur les échanges avec le cours d'eau aval

Les types de sortie d'eau des étangs dépendent de l'époque de construction, du choix du propriétaire et sont parfois choisis en fonction de la profondeur. Selon leur localisation géographique et leur histoire, certains systèmes de sortie d'eau ont été privilégiés. L'importance de la sortie d'eau dans l'étude thermique et plus précisément l'étude du continuum thermique au sein des cours d'eau et plans d'eau est fondamentale. En fonction de la profondeur choisie, des eaux de surface, de mi-fond, de fond ou un mélange d'eau de surface et de fond seront déversées dans le cours d'eau aval, avec des caractéristiques

physico-chimiques particulières (Touchart, 2007). Lors des phases de stratification des étangs, l'eau de surface est surchauffée, tandis que l'eau de fond est isolée à une température inférieure. Les cycles diurnes et nocturnes de l'eau peuvent être modifiés par une prise de l'eau de fond, dont la température varie à une temporalité différente du cours d'eau amont par isolement de la température de l'air (Touchart, 2007, Touchart & Bartout, 2010). Si le déversoir de surface entraîne une modification thermique pouvant être importante, la prise d'eau de fond soutire une eau pouvant être faiblement oxygénée dont les impacts sur la vie piscicole sont semblables à ceux de la température durant la période estivale (Touchart *et al.*, 2012, 2019).

Dans le but d'étudier à la fois les données thermiques brutes mais également les cycles de température et les teneurs en oxygène, les types de sortie d'eau seront étudiés dans la présente recherche. Les systèmes de sortie alloués aux étangs peuvent être généralisés dans les trois cas suivants :

Le déversoir est la sortie d'eau la plus commune en étang, installé sur une grande majorité d'entre eux. Le système consiste en un écoulement de la lame d'eau de surface se limitant généralement aux premiers centimètres. En Limousin, il représente plus de 70 % des plans d'eau (Touchart & Bartout, 2011). La couche superficielle de l'étang est prélevée vers le cours d'eau aval lorsque le bilan hydrologique de l'étang est positif. Durant les périodes de sécheresse, l'eau ne s'écoule plus sur le déversoir et les cours d'eau à l'aval et amont sont déconnectés en l'absence de vanne de fonds au sein de l'étang. La couche d'eau déversée représente la partie surchauffée de l'étang durant la période estivale. Certains étangs, à l'inverse, sont équipés de déversoirs de crue afin d'évacuer le trop plein hydrologique rapidement et ainsi éviter un risque d'inondation des terres à l'amont de l'étang.



Photo 3: Exemple de déversoir en cascade d'un étang des Vosges du Nord, affluent de la Zinsel du Nord. Q. Choffel, 2018

Lors des études d'impact thermique des étangs, le déversoir est le plus controversé, du fait de son réchauffement ponctuel pouvant s'avérer élevé.

Le moine est un système de sortie d'eau d'étang inventé au Moyen-Age par des moines cisterciens. Le système est basé sur l'ajout ou le retrait de planches et de grilles permettant de choisir le niveau de la prise d'eau dans l'étang. Il est équipé sur des étangs généralement profonds. La profondeur maximale moyenne des étangs équipés d'un moine est de 2,44 m contre 2,11 m pour les autres étangs, et deux fois plus grands (1,26 ha en moyenne contre 0,60 ha pour les autres types de sortie d'eau) (Touchart & Bartout, 2010¹²). Ces étangs à moine occupent également une place différente dans le bassin versant puisqu'ils sont très rarement localisés sur source.

Cependant, nombre de moines ne font l'objet d'aucune maintenance et sont donc limités à des sorties d'eau de fond. Le moine offre la possibilité de choisir la profondeur de prise d'eau à une ou plusieurs profondeurs souhaitées. Des eaux de fond, plus froides en été,

¹²Données pour les étangs étudiés sur le Limousin

peuvent être prélevées ou être mélangées avec des eaux de surface mieux oxygénées afin de trouver un équilibre (Figure 7). Ainsi, le moine a un impact thermique annuel moyen réduit par rapport à un déversoir de surface (Touchart et Bartout, 2010). Il permet également de gérer le niveau d'eau, ce que le déversoir ne peut effectuer. Ces systèmes sont privilégiés par les administrations pour leur réduction de l'impact thermique instantané, sans prendre en compte leur effet de réduction d'amplitude thermique journalière du cours d'eau aval par rapport à l'amont (*ibid.*, 2010). En Limousin, ces systèmes sont présents sur moins de 14 % des étangs, tandis que les dérivations ne représentent que 8 % (*ibid.*, 2010). Toutefois, la représentativité de ces deux systèmes est vouée à augmenter en raison des demandes de réduction d'impact thermique des étangs sur le milieu lotique.

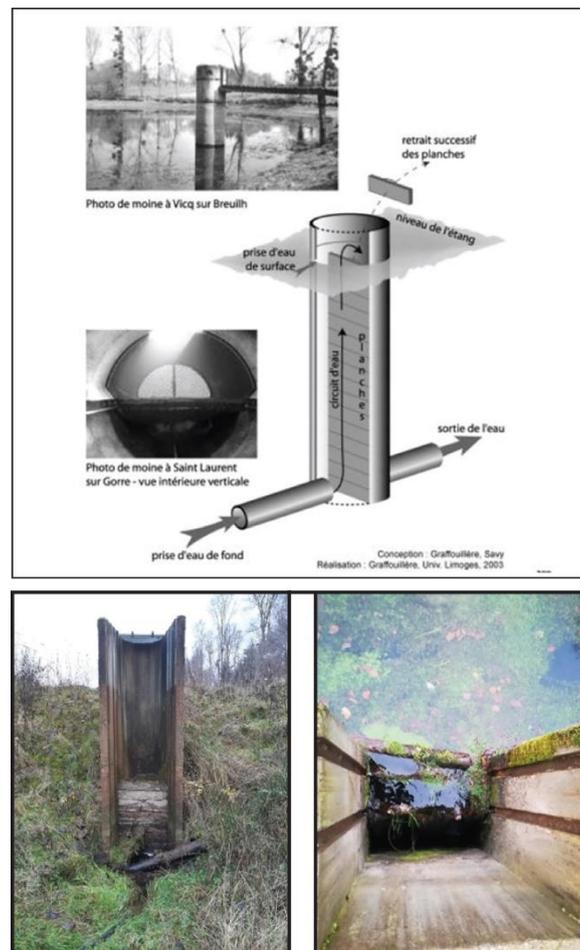


Figure 7: Fonctionnement du moine typique en Limousin en haut (Bartout, 2006), photo de moines sur des étangs asséchés de la Zinsel du Nord, en bas à gauche, vu d'en haut (à droite) (Q. Choffel, 2018).

La dérivation

Maître-mot de l'ensemble des restaurations de la continuité écologique, sédimentaire et piscicole actuelles, la dérivation de l'étang devient une technique de plus en plus utilisée et préconisée par les différentes institutions. Elle consiste en la mise en place d'un « *canal qui doit permettre de court-circuiter partiellement l'étang de barrage en recueillant une partie du cours d'eau avant de la restituer en aval de l'étang* » (Millot, 2015) (Figure 8). L'objectif est de limiter les nuisances de l'étang et d'améliorer les conditions physico-chimiques dans le cours d'eau aval. Les dérivations peuvent être des canaux contournant un étang, censé représenter la continuité de la rivière. Il existe également des étangs sur dérivation, construits sur un canal prélevé par le cours d'eau, à l'image des biefs des moulins. Les impacts et intérêts seront dans ce cas, légèrement différents. La dérivation n'est cependant pas un type de sortie d'eau en soi, puisqu'elle couple un étang avec un mode de gestion propre, et les caractéristiques lotiques d'un canal de dérivation.

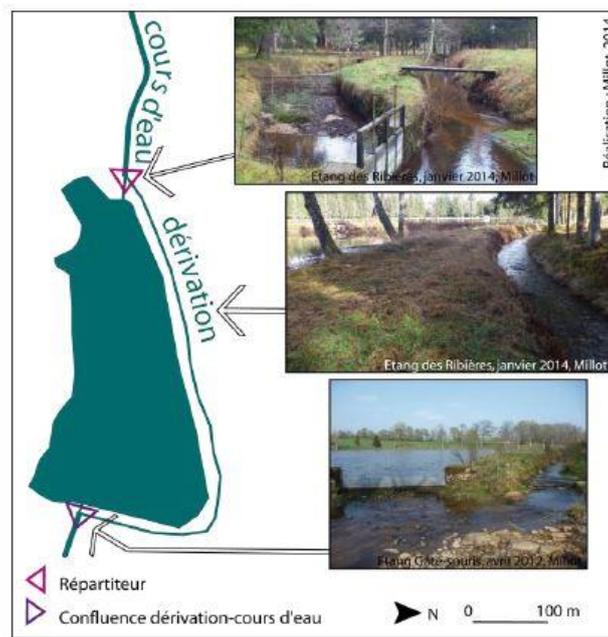


Figure 8: Principe de fonctionnement d'une dérivation (Millot, 2015)

Il existe deux types majeurs de dérivations, nommées par L. Touchart et P. Bartout (2011) comme des étangs sur dérivation ou des étangs sur cours d'eau contournés par une dérivation (Figure 9). Leur influence sur le milieu s'avère différente. Par la conservation du lit naturel de la rivière, les étangs sur dérivation limitent les pressions exercées par la dérivation et l'étang. A l'inverse, les étangs contournés par une dérivation sont localisés sur le lit

principal du cours d'eau et sont donc amenés à influencer ce dernier de manière plus conséquente.

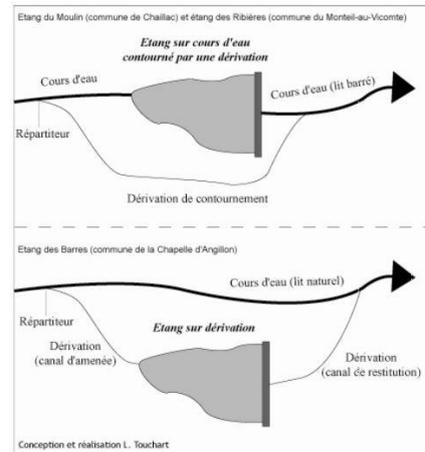


Figure 9: Schéma des deux types de dérivation majeurs (Touchart et Bartout, 2010)

L'installation de plans d'eau sur dérivation peut être une solution réductrice de certains impacts. Pour les plans d'eau existants, la tendance à la création d'une dérivation par contournement est grandissante. La réduction des influences, notamment thermique, reste cependant à approfondir (Millot, 2015, Touchart & Bartout, 2011). Son efficacité dépend de multiples facteurs, tels que le calibrage du canal et donc de la répartition des débits. Dans certaines régions, la sécheresse estivale entraîne des débits d'étiage sévères pouvant déconnecter la dérivation. L. Touchart et P. Bartout (2011) ont indiqué que la dérivation d'étangs limousins et du Centre ne fonctionne réellement que d'octobre à juin. La question de débit couplé avec la température est fondamentale. L'étude du bilan thermique, réunissant les deux éléments, est primordiale dans l'analyse thermique de la dérivation. La seule température ne se suffit pas puisque le débit peut être nul dans la dérivation lors de la période de réchauffement maximum, soit l'été.

2.2 es étangs étudiés: des étangs français caractéristiques de leur région aux petits lacs des hautes latitudes européennes

Afin de tenter d'être le plus englobant possible dans les aspects morphologiques, trois étangs français ont été instrumentalisés avec des données horaires continues au minimum sur une année entière, ainsi que des plans d'eau étrangers, en Estonie. Le premier étang instrumentalisé, en mars 2016, est celui de la Ramade, sur le plateau de Millevaches, à la frontière entre les départements du Puy de Dôme et de la Creuse. Il est représentatif des grands étangs peu profonds ennoyant des vallées à fond plat sur socle cristallin. En mai 2016, un second étang (appelé étang du Château¹³), de très faible superficie et de forte profondeur relative, a été instrumentalisé à proximité de la ville de Limoges, sur la commune de Rilhac-Rancon. Il fait partie de ces très nombreux étangs, difficilement cartographiables par leur très faible superficie, mais dont la profondeur est relativement élevée. Nombre de ces étangs sont présents sur les versants des bords des massifs anciens. Le troisième et dernier étang est un plan d'eau de superficie et profondeur moyenne relativement faible, à l'intermédiaire entre les deux précédents. Situé sur le bassin versant de la Zinsel du Nord, il fait partie des grands plans d'eau présents dans les Vosges du Nord et le Pays de Bitche, petite région à forte densité d'étangs, notamment en chaîne sur le cours d'eau.

Ces trois étangs ont été étudiés avec une méthodologie similaire, présentée dans le chapitre suivant. Un complément méthodologique a été apporté avec l'introduction de terrains d'étude en Estonie, où de nombreuses mesures ponctuelles en lacs naturels se rapprochant des morphologies stagnustres, fortement anthropisés, ont apporté une ouverture à ce projet et une connaissance plus fine des milieux limniques et stagnustres.

2.2.1 Contexte hydroclimatique des zones d'étude

Les variations d'altitude et de longitude sont un des éléments de modification du bilan thermique des lacs (Birge, 1915, Hutchinson, 1957, Gorham, 1964). La forte corrélation entre la température de l'air et la radiation solaire avec la température de l'eau entraîne des variations du bilan thermique selon sa position géographique à l'échelle de la planète. Notre hypothèse est que, à l'échelle de la France, les gradients continentaux et altitudinaux jouent

¹³En concordance avec la thèse de M. Al Domany (2017) ayant travaillé également sur cet étang.

un rôle dans la variation des températures et du bilan thermique des étangs. Cependant ce facteur climatique ne semble pas être prioritaire pour les grands lacs et la variation du bilan thermique est certainement dominée par la morphologie des plans d'eau (Lebedev, 1939, Hutchinson, 1957, Gorham, 1964). Pour les petits plans d'eau, la corrélation entre la température de l'eau et de l'air semble plus forte, amenant sûrement à une sous-estimation des conditions climatiques.

Les climats ont des influences variées sur la température du plan d'eau directement par réchauffement de la couche supérieure et indirectement par sa capacité à se brasser ou se stratifier ainsi qu'un lien direct avec les quantités d'eau des milieux lenticules et lotiques. Les liens entre climat et hydrologie ont été mis en avant par Meybeck *et al.* (2013) avec le développement des « hydrobelts », justifiant une certaine homogénéité hydroclimatique. Le découpage est effectué par bassin hydrographiques, hydroclimats et hydorrégions. En prenant en compte la température moyenne et les conditions d'écoulement, l'Europe continentale est sous un seul et unique hydrobelt, nommé « Midlat ». Les moyennes sont proches de la moyenne mondiale, hors zones en glace. Dans un climat océanique, la plus grande fréquence de vents modérés et de dépressions va entraîner un brassage estival plus fréquent que dans sa dégradation continentale.

2.2.1.1 Le haut Limousin et sa Montagne

Le climat océanique limousin, que l'on peut qualifier de « climat océanique à sécheresse d'été accentuée » (Estienne & Godard, 1970) est caractérisé par une amplitude thermique annuelle faible, toujours humide et doux, de par ses influences océaniques. La Montagne est le premier obstacle naturel rencontré par les arrivées d'air en provenance de l'ouest. Le type de temps de dépression Nord-Atlantique est le plus fréquent en Limousin, apportant un temps humide relativement doux. Plus rares sont les temps anticycloniques froids, ou les dépressions venant du sud, donnant de la neige. L'été, le type de temps le plus fréquent est le temps anticyclonique subtropical, présent en moyenne les 2/3 du temps. Il est provoqué par une apophyse de l'anticyclone des Açores, apportant un temps sec et plutôt chaud (Coq, 1976). Les alternances de dépressions océaniques, survenant par cycles d'une dizaine de jours en moyenne, durant l'été, est fondamental en limnologie stagnante, puisqu'elle va dicter les phases de brassage des étangs les moins profonds (Touchart, 2002).

Hydroclimatologie de l'étang de Rilhac

Au niveau de l'étang de Rilhac, les données de la station de Limoges-Bellegarde, située à 12 km de l'étang, donnent une température annuelle moyenne de 11,36 °C. Les précipitations sont élevées et atteignent les 1023 mm/an en moyenne, sur les quarante dernières années (MétéoFrance, station de Limoges-Bellegarde).

L'étang de Rilhac possède un seul émissaire, composé d'un système de moine, s'écoulant vers la rivière du Verrier, puis dans la Cane par une succession d'étangs. De par l'absence de tributaires, l'étang de Rilhac¹⁴ est classé comme étang de ruissellement de versant. Il a bénéficié du travail d'une thèse de climatologie (Al Domany, 2017) visant à mesurer son bilan hydrologique sur l'année 2014-2015 (étendues à 2016 pour certains paramètres) à l'aide de mesures réalisées quotidiennement sur l'étang. Pour les années 2014-2015, les quantités d'eau entrantes ont été mesurées à 107 947 m³, et les quantités d'eau sortantes à 115 367 m³.

D'un point de vue analytique, les différents éléments du bilan hydrologique ont été décrits de manière plus détaillée (Al Domany, 2017) :

- Précipitations tombées directement à la surface de l'étang : 967,07 mm * 0,47 ha = 4 545,23 m³
- Quantité d'eau perdue par évaporation : 964,5 mm * 0,47 ha = 4533,15 m³
- L'infiltration vers les nappes phréatiques a été mesurée à 452,89 m³, ce qui confirme la très faible infiltration de l'étang.
- La part de l'écoulement souterrain et les ruissellements superficiels ont été mesurés à 7861,49 m³, équivalent à une quantité d'eau entrante égale à 0,25 litre par seconde.

Hydroclimatologie de l'étang de la Ramade

Sur le plateau de Millevaches, à proximité de l'étang de la Ramade, la température moyenne annuelle s'élève à 9°C, tandis que les précipitations dépassent légèrement les 1000

¹⁴Renommé « étang du Château » par Mohammad Al Domany lors de sa thèse lié à la présence d'un château à proximité

mm, avec précisément 1031,9 mm (MétéoFrance, données de 1981 à 2010, station de la Courtine).

L'étang barre la jonction de deux cours d'eau, au nord celui de la Ramade, à l'ouest celui de la Quérade. Les débits moyens annuels évalués à partir de mesures ponctuelles sur les cours d'eau entrants et l'émissaire sont estimés à 0,4 m³/s pour le ruisseau de la Quérade, 0,325 m³/s pour celui de la Ramade. A l'exutoire de l'étang, le débit moyen annuel du cours d'eau a été estimé à 0,847 m³/s. Soit un bilan hydrologique positif de 0,09 m³/s en moyenne sur l'année. Les mesures étant ponctuelles et réparties sur plusieurs années, 2006/2007 (Aqua Concept Environnement, 2008) et 2018 (mesures personnelles), seul le caractère indicatif sera préservé. Elles permettent de donner un aperçu du débit moyen entrant de chaque cours d'eau et de leur proximité hydrologique, les deux tributaires ayant des débits très proches. Le temps de séjour des eaux dans l'étang de la Ramade peut être estimé à 19,6 jours en moyenne. Il est cependant très varié, avec une moyenne de 5 à 6 jours durant l'hiver et une moyenne de près de 30 jours durant la période estivale. Les forts étiages estivaux sont une des caractéristiques des cours d'eau du plateau de Millevaches s'écoulant sur les roches métamorphiques et granitiques.



Photo 4: L'étang de la Ramade qui "fume" lié aux échanges entre l'eau de l'étang et l'atmosphère, l'étang plus chaud réchauffe l'air frais matinal et provoque un brouillard de drainage. Le 11 juin 2018 à 6h (Cliché : Q. Choffel, 2018)

L'étang de la Ramade est composé d'un déversoir de surface en rive gauche, un déversoir de crue en rive droite ainsi que deux systèmes de vidange (appelés bondes) au plus bas de la chaussée (Figure 10). Le déversoir de surface apporte la majorité des débits au cours d'eau aval, tandis que des écoulements des vannes de fond sont présents. En période estivale, le besoin en débit minimum imposé exige parfois l'ouverture partielle des vannes.

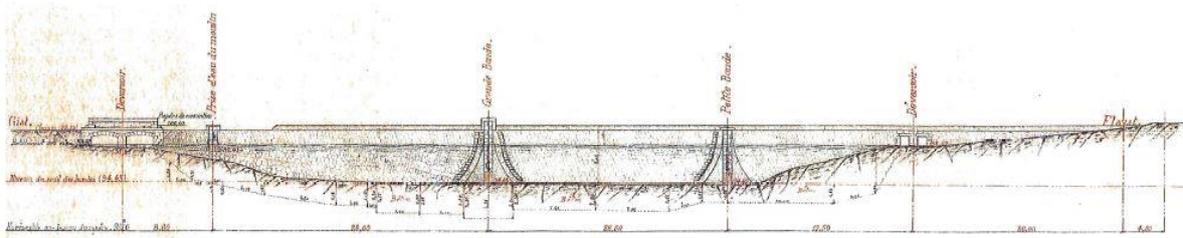


Figure 10: profil en long de la chaussée de l'étang de la Ramade (Somival, 2012)

2.1.1.2 Le plateau des Vosges du Nord

Le plateau gréseux des Vosges du Nord est composé de vallées assez fortement encaissées. L'influence de la topographie et de l'exposition crée de nombreux microclimats, comme dans les cuvettes du Pays de Bitche. Les précipitations sont variées, dépassant les 800 mm par an, jusqu'à plus de 1100 mm dans certains secteurs très localisés, en fond de vallée encaissée. La répartition des précipitations est hétérogène au sein du territoire, avec les plus faibles cumuls à l'est, et les maxima en certains secteurs du nord ou de l'ouest du plateau. A Mouterhouse, à 4km à l'ouest de l'étang étudié, la température moyenne annuelle est de 8,6 °C, avec des précipitations moyennes annuelles de 900 mm (Thiébaud *et al.*, 2013). Comparé aux deux autres terrains d'études, l'étang de Baerenthal est localisé dans un secteur plus froid, notamment en hiver, et légèrement moins pluvieux du fait de son éloignement des influences océaniques directes. Le nombre de jours de gel est important, supérieur à 80 jours en moyenne. L'amplitude thermique journalière est importante au printemps et en été et plus modérée en hiver.

Le cours d'eau entrant de la Zinsel du Nord dans l'étang de Baerenthal possède un débit moyen annuel de 0,54 m³/s pour les années 2016 et 2017. A la sortie de l'étang, la moyenne de débit est de 0,58 m³/s, soit un bilan hydrologique positif de 0,04 m³/s. Les débits entrants, mesurés à l'entrée du cours d'eau dans la queue de l'étang, et les débits sortants, mesurés à 2 km à l'aval, donnent un temps de séjour des eaux de 3,3 j en moyenne pour l'étang de Baerenthal¹⁵ (Tableau 1). Le maximum hydrologique est constaté durant la période hivernale, entre février et mars, tandis que le minimum se situe à la fin de l'été. Ce temps de séjour est le plus court des trois étangs, avec un effet possible sur la masse d'eau et sa capacité à se stratifier (Ambrosetti *et al.*, 2003).

¹⁵Les débits ont été mesurés par le SYCOPARC des Vosges du Nord. Opérateur : Alban Cairault

Tableau 1: Débits entrant et sortant de l'étang de Baerenthal, de février 2016 à février 2018 Source : Alban Cairault, SYCOPARC Vosges du Nord, 2018

Dates	Amont	Aval
23/02/2016	0,665	0,955
22/03/2016	0,732	0,71
09/08/2016	0,457	0,603
29/09/2016	0,351	0,32
13/03/2017	0,522	0,671
16/05/2017	0,33	0,434
29/08/2017	0,293	0,295
21/11/2017	0,498	0,456
01/02/2018	1,38	1,3
25/05/2018	0,483	0,58
13/09/2018	0,393	0,317
06/11/2018	0,401	0,38

2.1.1.3 La transition entre les tendances océaniques et continentales des franges de la Baltique

Les trois étangs français étudiés, du Limousin à la Lorraine, offrent un gradient latitudinal et longitudinal réduit mais réel. Afin d'étendre ce gradient, des lacs estoniens ont été ajoutés aux terrains d'étude dans l'hypothèse où le climat joue un rôle dans la variation du bilan thermique. En se déplaçant vers le nord-est du continent, les caractéristiques océaniques se dégradent au profit d'un climat plus continental avec des hivers froids.

Le climat semi-boréal de l'Estonie est caractérisé par sa continentalité, malgré la présence de la mer Baltique et du golfe de Finlande. Le climat est caractérisé par l'absence de saison sèche, avec un hiver froid et un été tempéré (classification de Köppen-Ceiger, d'après Hufty, 2001). A l'est de l'Estonie, où nos études se sont concentrées, la température moyenne annuelle est de 5,1°C avec des précipitations en moyenne annuelle de 736 mm

(Normale 1981-2010, Estonian Weather Service¹⁶). Dans la même station, la moyenne est de -6°C en février, contre 17°C en juillet. L'amplitude annuelle est ainsi de 23°C, plaçant cette région dans le climat tempéré de transition de Ch.-P. Péguy (1970), au-delà du climat océanique (moins de 20°C d'amplitude) mais en deçà du climat continental (plus de 28°C d'amplitude). Ces amplitudes ont une influence majeure dans l'étude du bilan thermique, dont le terme bilan justifie l'importance de la soustraction entre un maximum et un minimum annuel. L'intégration de l'Estonie dans nos études permet de border le bilan thermique dans sa frange latitudinale quasi-maximale en Europe continentale. L'effet de la latitude et de la continentalité pourra être intégré à nos hypothèses de travail.

La part du bilan thermique des lacs est fortement dépendante des conditions atmosphériques et morphologiques. Une petite part subsiste dans les échanges secondaires tels que les arrivées d'eau des tributaires ou les échanges avec la nappe ou les sédiments de fond. Rarement étudiée, cette part très secondaire du bilan thermique prend une mesure plus importante en étang (Touchart, 2002). La connaissance de la morphologie et des liens hydrologiques des étangs permet de cerner les facteurs capables d'influencer le bilan thermique des petites pièces d'eau.

2.2.2 Caractéristiques hydromorphologiques des étangs étudiés et de leur bassin versant

Le climat peut avoir une influence sur le bilan thermique des plans d'eau (Birge, 1915). Le rôle de la morphologie du plan d'eau dans la variation du bilan thermique a été démontré comme dominant dans l'étude lacustre (Hutchinson, 1957, Gorham, 1964, Allot, 1986). Il est donc essentiel de détailler les morphologies des plans d'eau étudiés, de leur profondeur, moyenne à maximale, à leur taille, le découpage de leur trait de côte ainsi qu'aux apports hydrologiques et des liens avec leur bassin versant. Ces éléments permettent une compréhension générale de la dynamique thermique de la masse d'eau et des échanges avec son environnement.

2.2.2.1 L'étang de la Ramade, un grand étang ennoyant sa vallée

L'étang de la Ramade se situe dans la Montagne Limousine, sur le plateau de Millevaches au sens large, plus précisément dans son extension périphérique orientale du

¹⁶Normales à la station de Johvi, 13km au nord-ouest de la zone d'étude de Kurtna

plateau de la Courtine. La montagne culmine à 987 m, avec une prédominance de roche granitiques. D'après Perpillou (1940) ce socle granitique est, de tout le Limousin, le plus riche en sources. Le contexte hydromorphologique de ces hautes terres granitiques influence les étangs à plusieurs niveaux. A petite échelle cartographique, la tectonique récente de rajeunissement du massif ancien a provoqué un bombement régional (Désiré-Marchand et Klein, 1986) à l'origine de la divergence hydrographique. Ce vaste plateau comporte des sommets en forme de dômes arrondis, avec de larges bombements de terrain alternant avec de larges dépressions (Demangeon, 1910) (Figure 11). La Ramade est ainsi drainée vers la Dordogne, mais confine à la ligne de partage des eaux avec le bassin de la Loire. Quant à la lithologie granitique, elle a permis, du fait des conditions morphoclimatiques tertiaires, la constitution d'un manteau d'altérites elles-mêmes perméables (Peyrat, 1975), favorable à la forte densité d'un chevelu hydrographique de petite taille caractéristique des têtes de bassin de cette région. A moyenne et grande échelle cartographique, le modelé en creux fait se succéder les alvéoles (Valadas, 1984), aux fonds plus ou moins tourbeux (Miras, 2004), fermés par des cloisons qui constituent autant de sites propices à la construction de petits barrages. En arrière de ceux-ci peuvent s'épanouir de grands étangs festonnés ou multilobés, à profondeur relative assez faible. Et ce sont ces derniers, ainsi que d'autres étangs plus petits de ce haut plateau, qui connaissent la plus grande stabilité de toute la région limousine (Perpillou, 1940, Adenis *et al.*, 1962) car, alors que bon nombre de plans d'eau avaient disparu ailleurs en Limousin durant la période 1850-1950 (Bartout, 2012) sous l'effet d'assèchements volontaires ou d'abandons, ceux-ci ont pu préserver leur intérêt économique local.

Le premier texte historique mentionnant l'étang de la Ramade date de 1484. Il fait état de la demande d'achat de l'étang par des chanoines de l'église de Clermont et les religieux gardiens du couvent des cordeliers de Clermont auprès de Guillaume de Rochefort (chevalier seigneur d'Aix) et Gaspar de Paignac (chevalier seigneur de Sonnat). L'étang leur a été vendu pour une valeur de 4120 livres tournois d'une part et de 620 escus vielz du poix de troys¹⁷. Il a ensuite été la propriété d'une famille privée bénéficiant de la force motrice de la chaussée équipée d'un moulin, pour ensuite être acheté par la Mairie de Giat en 1988.

¹⁷ Archives communales de la Mairie de Giat (63).

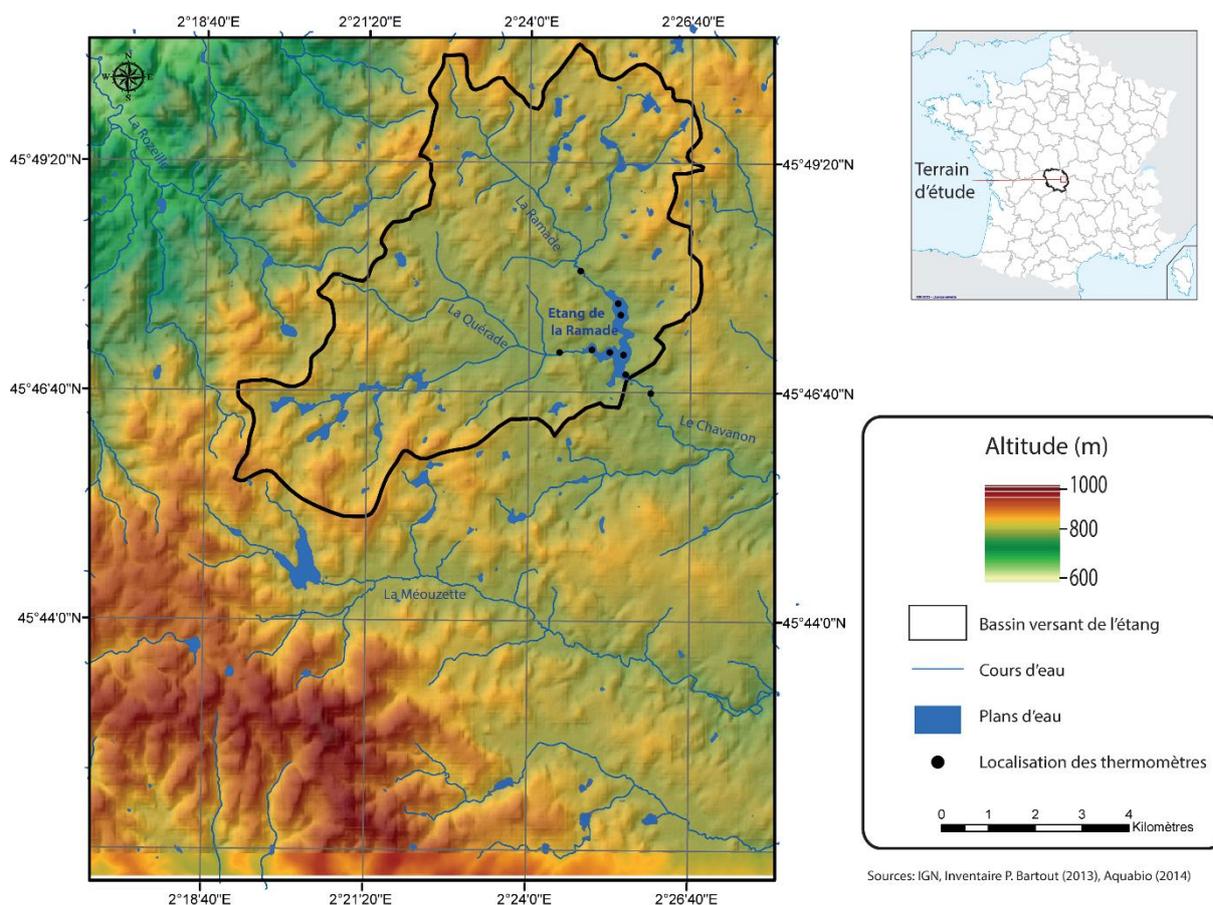


Figure 11: Carte de localisation du bassin versant de l'étang de la Ramade. Choffel et al., 2017

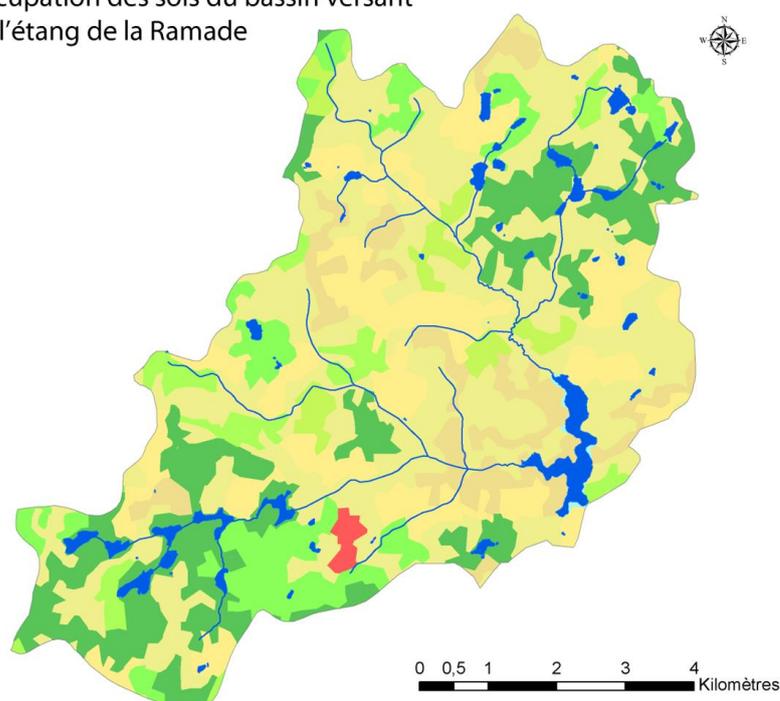
Occupation des sols du bassin versant

L'étang de la Ramade draine les eaux d'un bassin versant de 55 km², sur le plateau de Millevaches. Les eaux, avant de se jeter dans l'étang, traversent des sols forestiers et de pâture, avec parfois des cultures. Les zones boisées recouvrent 35 % du bassin versant et sont principalement situées dans les zones amont, au sud-ouest ainsi qu'au nord-est majoritairement (Figure 12). Les zones de pâturage recouvrent le plus grand pourcentage d'occupation du sol du bassin, avec 38 % et 21 km². Le reste du bassin versant, soit 23 %, est recouvert par 13 km² de superficie (CLC, 2012 modifié) de cultures diverses. Le très faible taux d'urbanisation (0,01 % de l'occupation des sols.), voire son inexistence, est une des particularités du bassin versant de l'étang de la Ramade.

En amont du grand étang de la Ramade, la quasi-totalité des cours d'eau sont déjà pourvus d'étangs. Le ruisseau de la Quéirade se jetant à l'ouest de l'étang de la Ramade, est barré par 11 étangs sur un bras, dont des étangs sur source, à l'extrême sud-ouest du bassin

versant. A l'opposé, au nord-est, de petits ruisseaux ne possèdent pas moins de 17 étangs avant de rejoindre le cours d'eau de la Ramade. Un total de 28 étangs jalonne les deux cours d'eau avant qu'ils atteignent l'étang de la Ramade, jusqu'à 9 fois plus grand que les autres. En comptant les étangs au fil de l'eau et ceux isolés, le bassin versant comporte 71 pièces d'eau, soit une stagnucité élevée de 3,4 %, étang de la Ramade compris. La présence de nombreux étangs en amont de celui de la Ramade modifie les paramètres physico-chimiques du cours d'eau. Lors de son entrée dans l'étang, les deux cours d'eau ont des caractéristiques héritées de la présence de nombreux étangs, influençant la température de l'eau.

Occupation des sols du bassin versant de l'étang de la Ramade



Légende	
Territoires agricoles - Prairies	Forêts et milieux semi-naturels - Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée
231 : Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole	321 : Pelouses et pâturages naturels
Territoires agricoles - Zones agricoles hétérogènes	322 : Landes et broussailles
241 : Cultures annuelles associées à des cultures permanentes	324 : Forêt et végétation arbustive en mutation
242 : Systèmes culturaux et parcellaires complexes	Surfaces en eau - Eaux continentales
243 : Surfaces essentiellement agricoles	511 : Cours et voies d'eau
244 : Territoires agroforestiers	512 : Plans d'eau
Forêts et milieux semi-naturels - Forêts	Territoires artificialisés - Zones urbanisées
311 : Forêts de feuillus	111 : Tissu urbain continu
312 : Forêts de conifères	112 : Tissu urbain discontinu
313 : Forêts mélangées	

Sources: CLC_2012; IGN BD Carthage; BD Bartout

Réalisation: Q. Choffel, 2018

Figure 12: Carte d'occupation des sols du bassin versant de la Ramade (Choffel, 2017)

Morphologie de l'étang de la Ramade

La superficie de l'étang de la Ramade, estimée à environ 62 ha le classe dans la catégorie des grands étangs. Sa profondeur cependant est limitée à 3 m au maximum, au niveau de la chaussée. La zone profonde du plan d'eau se limite au petit bassin proche de la chaussée et à la partie centrale avec respectivement 1,40 et 1,30 mètres de profondeur moyenne (Figure 13). L'étang est situé à la confluence des deux cours d'eau, apportant une morphologie particulière et avec deux bassins distincts, au nord et à l'ouest. Le bassin au nord est la partie la moins profonde avec 0,5 m de profondeur moyenne pour un maximum de 1,2 m. Il représente cependant une grande partie de l'étang en superficie, avec près de 20 ha. Le bassin à l'ouest est légèrement plus réduit en superficie (10 ha) et plus profond, avec une moyenne de 0,7 m et une profondeur maximale de 1,5 m.

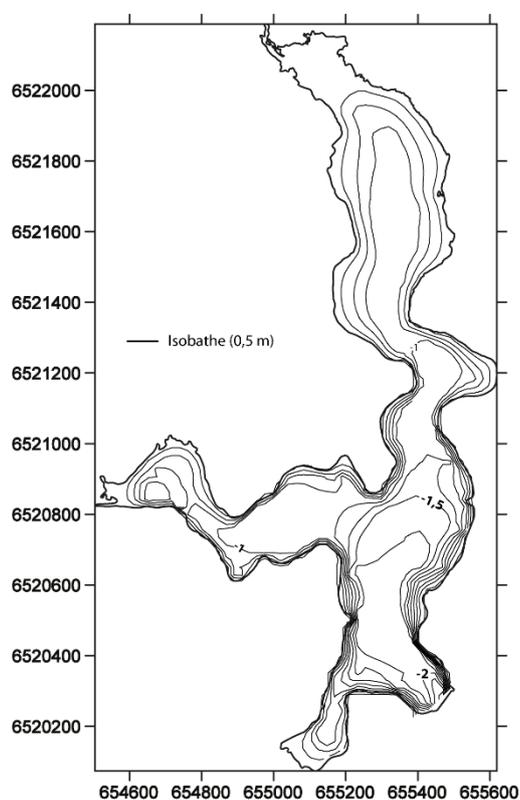


Figure 13: Carte bathymétrique de l'étang de la Ramade. Données: Aquabio, 2011. Réalisation Q. Choffel, 2017

Les différents bassins, reliés entre eux en permanence par des détroits plus ou moins ouverts, permettent l'hypothèse d'une variation spatiale importante de la température. La zone la plus profonde, au niveau de la chaussée, est fortement éloignée du centre de gravité de l'étang. La représentativité des points de mesure, au droit de la zone la plus profonde, peut être questionnée sur cet étang.

Usages et intérêt socio-économique de l'étang

L'étang de la Ramade attire de nombreuses activités. La pêche sportive, en *no-kill*, est l'activité principale du plan d'eau, avec la présence d'une SARL dédiée. Lieu de pêche réputé, il attire bon nombre de touristes des environs et de toute l'Europe (notamment allemands et hollandais)¹⁸, qui y séjournent jusqu'à plusieurs semaines. Il est également le lieu de rendez-vous en été, pour se détendre, se promener (présence de sentiers balisés, observatoire ornithologique) et s'y baigner pour les habitants des environs, avec la présence d'une zone de divertissement et de restauration sur les bords de l'étang (Photo 5). Ses queues d'étangs et le secteur nord sont situés en ZNIEFF de type 1 « Etang de la Ramade », recouvrant un total de 115 ha (INPN). Les centres d'intérêt de cette zone de protection sont patrimoniaux (écologique, faunistique, floristique) et fonctionnels pour les oiseaux migratoires et paysagers. Le site abrite des espèces en migration ou hivernage comme le Balbuzard pêcheur (*Pandion haliaetus*) ou le Chevalier Gambette (*Tringa totanus*). Des espèces nicheuses remarquables sont présentes sur le site dont le Bruant des roseaux (*Emberiza Schoeniclus*), la Sarcelle d'hiver (*Anas crecca*) ou encore le Râle d'eau (*Rallus aquaticus*). L'ensemble est situé dans une ZNIEFF de type 1 « Etangs et zones tourbeuses de la région de Flayat » d'une superficie totale de 1 387 ha.

¹⁸ Communication personnelle du gestionnaire du plan d'eau en charge de l'activité de pêche, Jean-Pierre Plane.



Photo 5: Etang de la Ramade en juin 2018 avec des barques à disposition pour les pêcheurs. Zone de baignade et récréation avec restauration sur les bords de l'étang (bas). Clichés : Q. Choffel

2.2.2.2 L'étang de Rilhac, petit étang profond dans la périphérie limougeaude

Le second étang sera appelé étang de Rilhac, situé sur la commune de Rilhac-Rancon, à une dizaine de kilomètres au nord-est de la ville de Limoges. L'étang est situé sur source, bénéficiant du ruissellement de surface et sub-surface d'un petit bassin versant agricole (Figure 14). Son exutoire, équipé d'un moine, se déverse dans le ruisseau du Verrier et sa succession d'étangs en chaîne, puis, via le ruisseau du Palais, dans la Vienne (Figure 14).

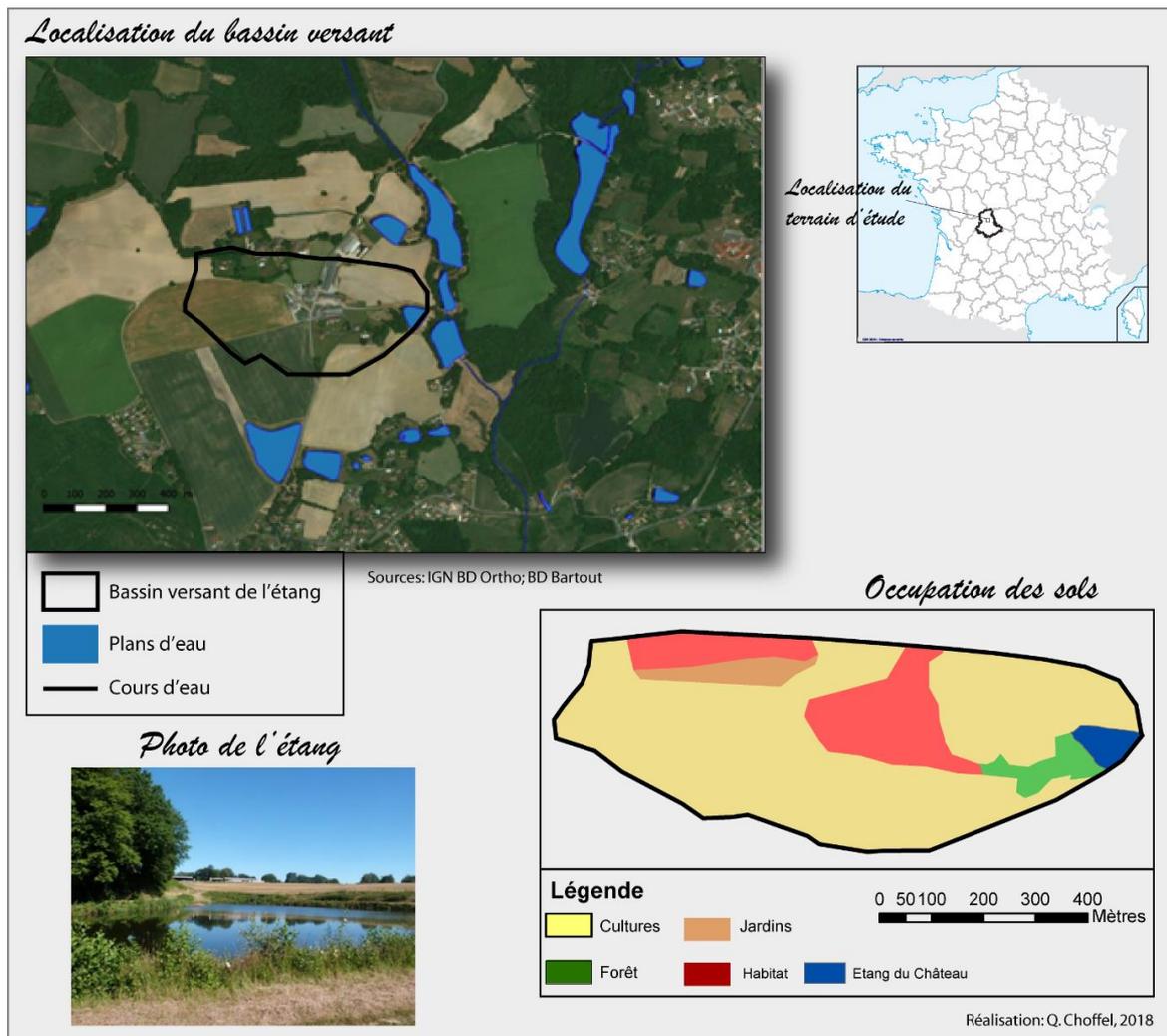


Figure 14: Carte du bassin versant de l'étang de Rilhac – Image satellite, carte d'occupation des sols et photographie de l'étang du château à Rilhac avec la butte végétalisée sur la gauche et des champs en arrière plan. Cliché Q. Choffel, juin 2018

Morphologie de l'étang de Rilhac

L'étang de Rilhac a une profondeur relative importante, dépassant 4m pour une superficie de 0,4 ha (Figure 15). Il est représentatif des petits étangs de bas pays Limousin en tête de bassin, formé du barrage d'un simple vallon encaissé. La présence d'une butte boisée adossée à la partie ouest sud-ouest de l'étang apporte l'hypothèse d'une possible influence de la topographie et du couvert forestier sur la répartition de chaleur au sein de l'étang.

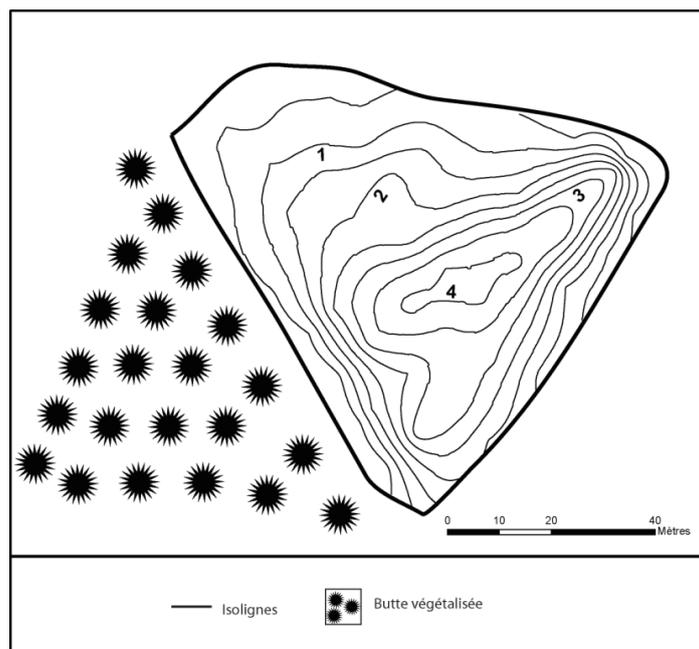


Figure 15: Carte bathymétrique de l'étang de Rilhac et de son environnement. Cliché Q. Choffel, juin 2018

Le petit étang de Rilhac est situé sur un versant en zone agricole (Figure 14) avec un bassin versant rural, comprenant une exploitation fermière. Il est entouré de cultures, principalement céréalières, dominées par le blé et le maïs.

Occupation du sol et bassin versant

L'étang de Rilhac diffère assez fortement de celui de la Ramade, par la taille de son bassin versant ainsi que son occupation du sol. L'étang est le réceptacle d'un espace très réduit, atteignant à peine 0,24 km². Il est communément appelé étang de ruissellement puisqu'il n'est dépendant d'aucun tributaire, et forme, en soi, son émissaire. L'occupation du sol de l'espace drainé vers l'étang est à grande majorité agricole, avec 75 % de l'espace cultivé. Avec la présence d'une exploitation agricole ainsi que de quelques habitations dispersées, la totalité du bâti recouvre 17 % du bassin versant. La couverture forestière, quant à elle, est très réduite avec seulement 3,3 %, confinés sur une butte à proximité de l'étang, sur sa façade ouest. La présence de cette forêt, bien que ne recouvrant qu'une faible superficie, est un élément majeur dans notre réflexion limnologique. Surplombant l'étang et lui offrant de l'ombrage sur sa moitié ouest, la question se pose sur l'effet de cet ombrage sur la structure thermique du plan d'eau et sa répartition de chaleur en surface et aux différentes profondeurs.

2.2.2.3 L'étang de Baerenthal ennoyant la vallée de la Zinsel du Nord

L'étang de Baerenthal est parmi les étangs les plus grands et volumineux de la vallée de la Zinsel du Nord. Cet étang de 11 ha de superficie, avec un volume d'environ 120 000 m³, appartient à la commune de Baerenthal. Sa profondeur maximale est d'environ 2,5 m, au niveau de la chaussée, pour une profondeur moyenne de 1 m (Figure 16). Il est soumis à l'AAPPMA du même nom pour sa gestion de pêche.

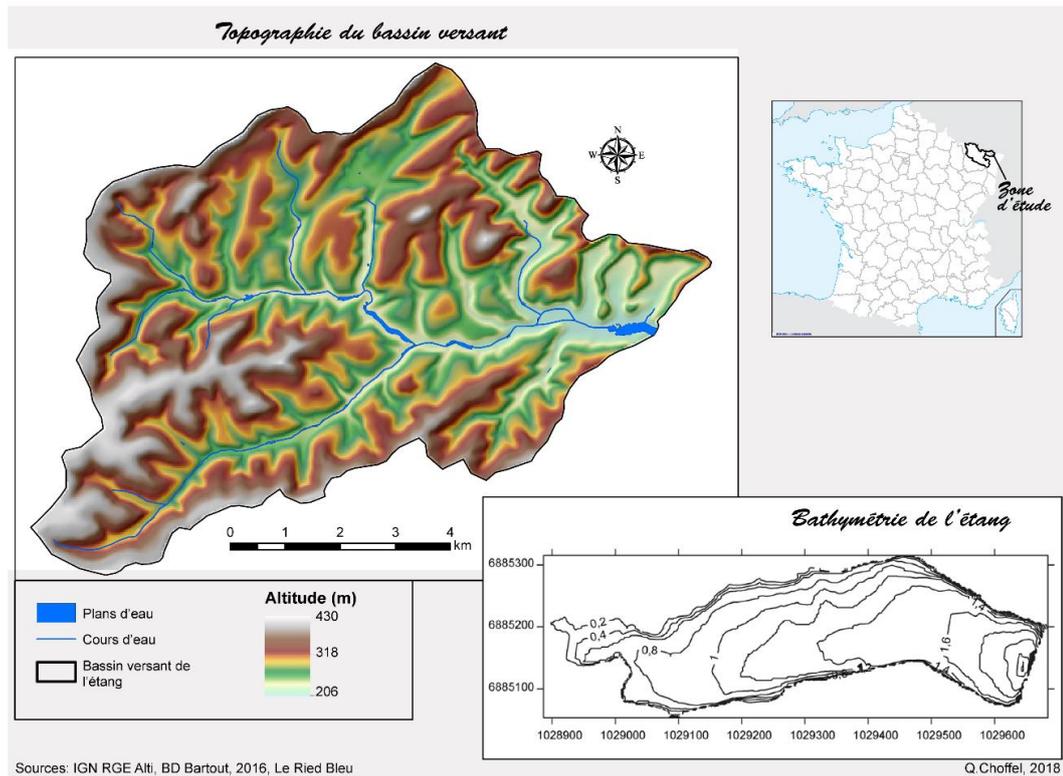


Figure 16: Cartes de localisation de l'étang de Baerenthal dans son bassin versant avec la carte bathymétrique.
Données bathymétriques : Le Ried Bleu, 2017, réalisation : Q. Choffel, 2018

L'étang étudié est à la limite amont de la Zinsel du Nord, il est un des derniers des 65 petits étangs situés plus en amont, barrant les différentes vallées. L'étang est doté initialement de 4 sorties d'eau différentes, dont deux déversoirs ainsi que deux vannes de fond. Les sorties d'eau en rive droite s'écoulent dans la Zinsel tandis que le déversoir en rive gauche de l'étang s'oriente vers un autre étang, celui du Ramstein. Ce dernier est une base de loisir ainsi qu'un site de baignade important pour la commune, avec la présence d'un camping. L'étang du Ramstein nécessite donc une arrivée d'eau chaude du déversoir de l'étang de Baerenthal afin de permettre aux touristes et locaux de s'y baigner (Photo 6 : L'étang de baerenthal depuis la chaussée (haut) sortie d'eau de déversoir de l'étang de

Baerenthal vers le Ramstein (gauche) et site de baignade de l'étang du Ramstein (droite). Q. Choffel, 2018).



Photo 6: : L'étang de baerenthal depuis la chaussée (haut) sortie d'eau de déversoir de l'étang de Baerenthal vers le Ramstein (gauche) et site de baignade de l'étang du Ramstein (droite). Q. Choffel, 2018

Géomorphologie de la région des Vosges du Nord

Au début du Trias, la région vosgienne s'apparentait à une vaste plaine s'étendant de la Lorraine à la Hesse. Drainées par des rivières de type oued, chargées de sables et de galets, ces rivières sont à l'origine du Grès Vosgien ainsi que d'autres formations gréseuses ou conglomératiques du Buntsandstein. Le terme de Buntsandstein, employé par Werner dès le début du XIX^{ème} siècle, comporte toutes les formations gréseuses situées entre le Permien et les formations marno-dolomitiques du Wellenkalk (Perriaux, 1961). Cet ensemble peut être décomposé en trois paysages morphologiques (Battiau-Queney, 1993) : les hautes Voises, les plateaux sous-vosgiens de la bordure sud-ouest et les Vosges septentrionales gréseuses. Au

nord, la montagne des Hautes Vosges disparaît, et l'on atteint les Basses Vosges, où le socle disparaît et seule reste la couverture de grès (Flageollet, 2008). Notre attention se portera particulièrement sur ce dernier paysage morphologique, où se situe la vallée de la Zinsel du Nord.

Les Vosges septentrionales sont un plateau gréseux fortement disséqué par un réseau de vallées drainant pour l'essentiel vers l'est, débutant au nord du seuil de Saverne. Les vallées s'encaissent de 100 à plus de 200 m, avec leurs têtes de bassins souvent sèches en raison de la perméabilité des grès triasiques (Battiau-Queney, 1993). Une grande partie du bassin versant de la Zinsel du Nord est situé dans le grès vosgien inférieur. Ce grès de couleur brun-rouge clair est caractérisé par une abondance de feldspaths, avec une présence fréquente de galets (Photo 7). La partie amont, en tête de bassin, connaît quelques affleurements de grès à Voltzia, principalement sur la partie ouest. Cette structure du Buntsandstein supérieur connaît des alternances de banc d'argile (0,10 à 1 m d'épaisseur) et de grès. Il bénéficie souvent d'une trilogie argile-limite, grès massif et ensemble argileux de base (Perriaux, 1961). La sédimentation gréseuse est issue du domaine continental et marin en certains lieux. La présence de nombreux restes végétaux évoque un climat semblable au climat de la zone soudano-sahélienne actuelle, à savoir une savane arborée (Grauvogel, 1947, 1951, 1952¹⁹). Dans la région de Bitche et de la Petite Pierre, aux extrémités amont du secteur étudié, les domaines continentaux et marins s'affrontent. Le secteur semble avoir été envahi par une mer venant du nord-est, du domaine germanique. De nombreux fossiles attestent d'une alternance de faune lacustre, estuarienne et carrément marine. La mer fit de timides apparitions lors de l'époque du grès à Voltzia, avant d'envahir de manière conséquente le centre du bassin germanique au Muschelkalk.

¹⁹cité par Perriaux, 1961

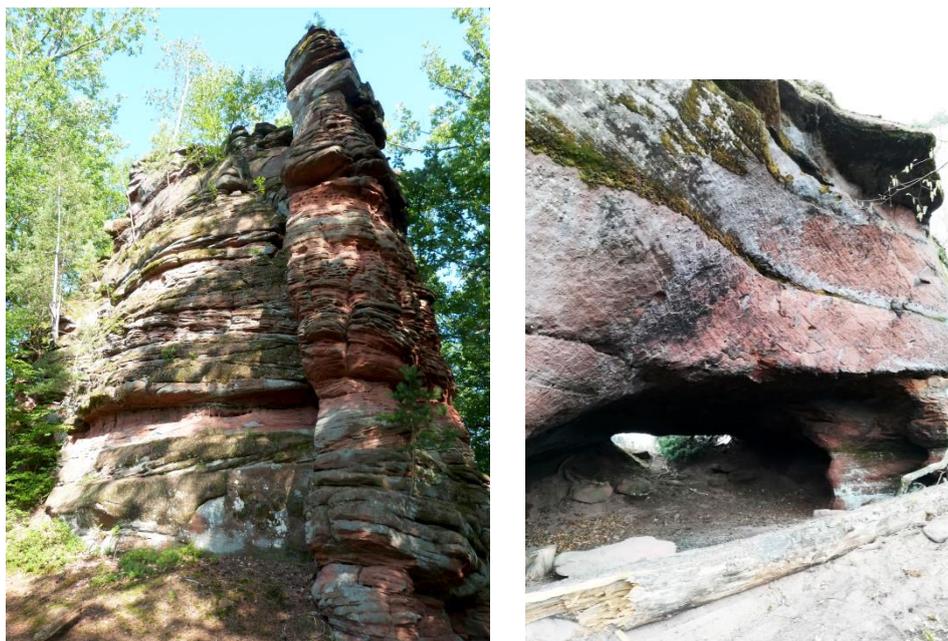


Photo 7: Affleurements de grès vosgien à proximité de l'étang de Baerenthal (cliché Q. Choffel, avril 2018)

Historique des étangs du pays de Vasgovie

Le patrimoine lentique de la Lorraine occupe les vallées des hautes et basses Vosges, la Vôge, les terrains sédimentaires ainsi que les fonds de vallée (Mathis & Mathis, 2016). Les terroirs d'étangs ont été créés pour une mise en valeur piscicole durant le Moyen-Âge. Ils ont permis de valoriser des terroirs peu exploitables comme des zones humides et marais, terrains argileux ou landes, peu propices à l'agriculture. Les premières traces écrites des étangs du pays de Bitche, intégré dans l'ancienne région de Vasgovie, datent du Moyen-Âge. La première interprétation met en avant une création par les moines de Sturzelbronn, dont l'influence s'étendait à l'ensemble du massif des Vosges du Nord (Jéhin, 2007). Les moines avaient créé ces retenues afin de satisfaire, dans un premier temps, leur besoin en poisson. Avant la révolution, quelques recensements avaient permis de connaître le nombre et l'évolution des étangs. Ainsi Thierry Alix, en 1594 (cité par Jéhin, 2007), dénombrait 35 étangs et 15 réservoirs dans le comté de Bitche. Le nombre d'étangs a ensuite régressé, nombre d'entre eux ayant été abandonnés. En 1673, seuls 13 étangs et 9 réservoirs persistaient. Le mauvais état des étangs et leur mise à l'abandon inquiétèrent les autorités locales à partir de la fin du XVII^{ème} siècle. Une lente reconstruction eut lieu au début de ce siècle, encouragée par les autorités afin de disposer du poisson nécessaire à la consommation et au respect des règles religieuses. A compter du XVIII^{ème} les étangs furent utilisés pour exploiter la force

motrice du cours d'eau et alimenter les forges présentes sur le territoire (Jéhin, 2007). Sur le cours d'eau de la Zinsel, et plus globalement dans le massif des Vosges du Nord, des étangs temporaires ont été mis en place par les flotteurs afin d'assurer le départ des trains de flottage sur des débits faibles (Mathis et Mathis, 2016). Le lâché d'eau des étangs était nécessaire afin de garder un débit important pour le transport du bois vers les villes de la plaine d'Alsace. L'héritage actuel de ce système réside dans la présence de nombreux étangs en chaîne, espacés de quelques mètres seulement sur les affluents de la Zinsel du Nord. L'étang de Baerenthal est quant à lui visible sur la carte de l'état-major (1820-1866) et sur la carte de Cassini (1756-1815).



Photo 8: Petits étangs sur les affluents de la Zinsel du nord. Cliché: Q. Choffel, 2018

l'étang de Baerenthal au cœur d'un projet de restauration de la continuité dans la vallée de la Zinsel du Nord

Dans une volonté de permettre une continuité écologique et sédimentaire au sein du cours d'eau de la Zinsel du Nord et de ses affluents, l'étang de Baerenthal est sous l'étude d'un projet de dérivation. Dans le cadre de ce projet, le laboratoire CEDETE est en charge de l'analyse thermique et hydrologique au sein de l'étang et tout au long du bassin versant, tandis que le laboratoire LIEC (Université de Lorraine) étudie l'hydrobiologique (invertébrés, paramètres physico-chimiques, décomposition de la matière organique). La fédération de pêche de Moselle ainsi que l'ONF font partie également du projet financé par l'Agence de l'Eau et porté par le territoire des Vosges du Nord afin d'apporter leur expertise et effectuer des études de la répartition géographique du peuplement piscicole. Pour notre étude,

l'objectif principal est de connaître l'état initial du plan d'eau et sa structure thermique avant la mise en place de la dérivation et donc une possible modification hydrologique et thermique. La modification du volume entrant dans l'étang entraînerait un impact en termes de temps de résidence de l'eau, apports en nutriments et oxygène et sur les processus de stratification et brassage de la colonne d'eau. Ces différents impacts liés à la construction d'une dérivation sont encore inconnus. Une étude avant/après travaux de dérivation permettrait une analyse concrète, sur du moyen ou long terme (Millot, 2015). L'étude permettrait également de connaître la meilleure localisation possible de la dérivation ainsi que de possibles alternatives à la mise en place d'une telle infrastructure pouvant s'avérer coûteuse et sans intérêt significatif dans certains cas (Millot, 2015).

Bassin versant et occupation des sols

L'étang de Baerenthal est le réceptacle d'un espace de 50 km², façonné dans les vallées encaissées des Vosges du Nord. Son bassin versant se distingue par une surface forestière exceptionnelle, recouvrant 94 % du territoire. Seules quelques cultures de fond de vallon (1,40 %) et la présence de petits hameaux et villages (0,03 %) sont recensés. Les étangs offrent une diversité paysagère avec pas moins de 42 pièces d'eau présentes sur le bassin, la plupart au fil de l'eau, barrant les petits ruisseaux de tête de bassin. La surface en eau du territoire, recouverte par les étangs, est de 0,6 %. La grande majorité des étangs sont de petite à très petite taille, avec une médiane à 0,165 ha, et une moyenne à 0,7 ha (Figure 17: Carte de l'occupation des sols du bassin versant de l'étang de Baerenthal. Q. Choffel, 2017). Seuls les étangs de Mouterhouse, quelques kilomètres en amont sur la Zinsel du Nord, et de Baerenthal dépassent les 5 ha avec 6,33 ha pour le premier et 11,3 ha pour le second (Base de données Bartout, 2018).

Occupation des sols du bassin versant de l'étang de Baerenthal

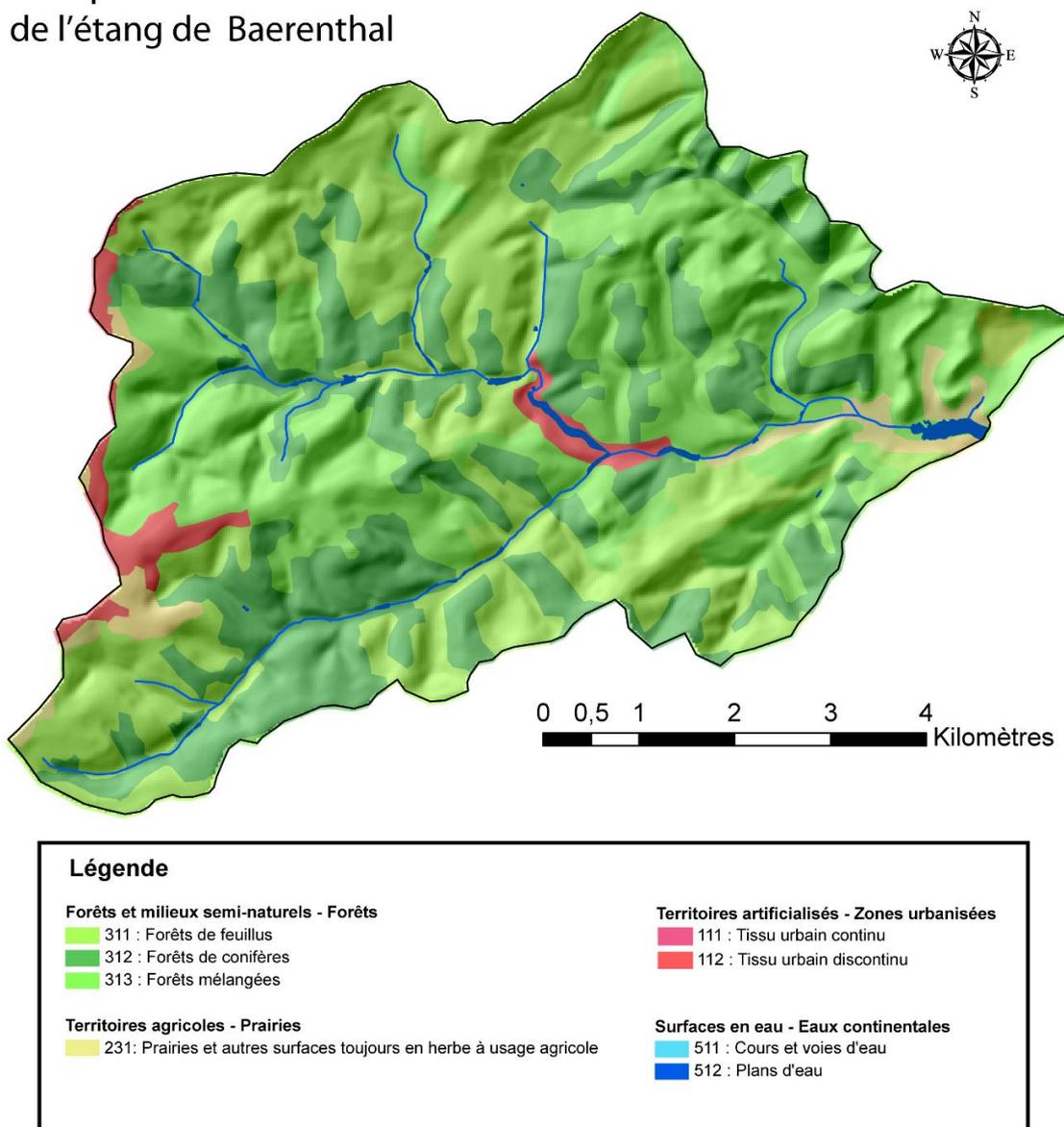


Figure 17: Carte de l'occupation des sols du bassin versant de l'étang de Baerenthal. Q. Choffel, 2017

2.2.3 Représentativité et extrapolation des terrains d'études aux régions françaises

Les trois étangs étudiés offrent de fortes variations de morphologie. Le grand étang de la Ramade et le petit étang de Rilhac permettent de borner les limites hautes et basses de superficie. Celui de Baerenthal se situe d'un point de vue morphologique, entre les deux premiers cités. Au niveau de la profondeur maximale, l'étang de Rilhac se rapproche des maximas relevés en étang, situés entre 4 et 6m. Ce dernier est caractérisé par un indice de creux moyen (Meybeck, 1995) très élevé pour un étang, avec une valeur de 31,6 contre 109

respectivement 1,52 et 2,88 pour les étangs de la Ramade et Baerenthal. Cet indice donne un aperçu de la morphologie de la cuvette et donc de la capacité du plan d'eau à se stratifier. Les principales caractéristiques morphologiques des étangs et leur bassin versant ont été résumées dans le tableau récapitulatif ci-dessous (Tableau 2).

Tableau 2: Principales caractéristiques des trois étangs étudiés et de leur bassin versant

	Caractéristiques	Etang de la Ramade	Etang de Rilhac	Etang de Baerenthal
Morphométrie de l'étang	Longueur maximum (Lmax) en m	2668	105	1197
	Largeur maximale (Bmax) en m	1 109	99	305
	Profondeur moyenne (m)	1,185483871	2	1
	Profondeur maximale (m)	3,5	4,25	2,6
	Profondeur relative (%)	0,39	5,95	0,66
	Indice de creux moyen (Ic)	1.52	31.6	2.88
	Superficie (A) en m ²	620 000	4 000	120 000
	Volume en m ³	735 000	8 000	120 000
	Temps de résidence moyen (en jours)	19,6	7	2,5
Caractéristiques du bassin d'alimentation	Superficie du Bassin versant en km ²	55	2,8	50
	Altitude maximale du bassin en m	830	350	420
	Altitude moyenne du plan d'eau en m	737	337	200
	Dénivelé en m	93	13	220
	Lithologie	Tonalites /Monzogranitites	Orthogneiss granitique	Grès
Hydrodynamique de l'étang	Marnage maximal (m)	1,2	0,2	0,4
	Fetch effectif moyen (km)	0,83	0,006	0,12

L'étang de la Ramade est représentatif des grands étangs peu profonds majoritairement présents dans des régions telles que les grands étangs lorrains, la Woëvre, et la Bresse. Ils sont souvent connectés au réseau hydrographique, sur des cours d'eau de rang de Strahler supérieur à 3, soit à des positions intermédiaires entre la tête de bassin et l'aval de cours d'eau. Si l'on prend en compte l'occupation du sol du bassin versant de l'étang de la Ramade, ce dernier est représentatif des zones de pâturage importantes, largement

présentes sur les massifs anciens tels que le Limousin, Massif-Central, ou encore le massif Armoricaïn et les Vosges.

Le petit étang de Rilhac est marqué par son fort encaissement sur un versant, avec une profondeur moyenne élevée pour un étang, liée à sa forte profondeur maximale, proche de la limite lacustre, ainsi qu'une superficie très réduite. Ces étangs sont dominants dans les versants limousins, la Vôge, le Sundgau, le massif armoricaïn et le Pays de Bitche (sur les têtes de bassin) (Al Domany, 2017). Au niveau de l'occupation des sols, l'étang de Rilhac est représentatif des espaces périurbains, avec de nombreuses cultures et une forte présence de bâtis.

Le troisième et dernier étang, celui de Baerenthal, se classe entre les deux premiers étangs. Sa superficie moyenne et sa profondeur maximale inférieure à 2,5 m se rapproche un peu plus d'un étang pelliculaire (bien que la limite du terme pelliculaire puisse être discutée pour cet étang), aux bornes entre les grands et petits étangs présentés. Ce type d'étangs, de profondeur et superficie moyenne, est largement présent en Dombes, Pays de Belfort (Pays des mille étangs) et Sologne. Son occupation des sols, quant à elle, est caractéristique des milieux fortement forestiers, tels que les Vosges du Nord, la Sologne ainsi que les hauts versants des Vosges et du Limousin.

Tableau 3: Occupation des sols des bassins versants des trois étangs étudiés. Q. Choffel, 2017

	Superficie BV (km²)	% de forêt	% de pâtures	% de cultures	% d'étangs	% d'urbanisation
Ramade	55	34,5	38,2	23,6	3,4	0,01
Rilhac	0,24	3,3	0	75	0	17,5
Baerenthal	50	94	1,6	1,4	0,6	0,03

Les trois étangs étudiés ont des variations de morphologie intéressantes, permettant de cerner différents types d'étangs, du plus grand au plus petit, et d'étangs profonds à moyennement profonds. Ces caractéristiques permettent d'analyser s'il existe des variations fortes en fonction de la morphologie du plan d'eau. Cependant, les aspects environnementaux ont aussi leur importance, notamment dans les besoins d'extrapolation

des études et de représentativité des milieux étudiés. Avec un étang typique de milieu agricole, un autre présent dans une zone forestière et enfin un troisième dans une zone de pâture, les différents milieux paysagés sont abordés ici.

La composante climatique varie peu entre les plans d'eau choisis, l'hypothèse d'influence du climat sur le bilan thermique et la dissociation des masses d'eau de ces milieux n'est pas majeure, la morphologie restant majeure, mais garde un intérêt fort. Dans cette optique, l'ouverture à des milieux au climat très différent peut apporter des solutions sur les valeurs du bilan thermique et les influences des facteurs climatiques sur la répartition de chaleur au sein des plans d'eau.

2.2.4 Etude de plans d'eau du nord-est de l'Europe : une ouverture estonienne vers d'autres plans d'eau de petite taille

En Europe, la segmentation entre les zones de plans d'eau à prépondérance naturel et artificiel suit la ligne de dépôts morainiques de la dernière glaciation. Au nord de cet arc traversant le nord de l'Allemagne et de la Pologne et le sud des pays Baltes, visible sur la carte de répartition des plans d'eau (Figure 18 Figure 18: Carte de la répartition des plans d'eau en Europe (Bartout et Touchart, 2013)) les lacs sont à dominante naturelle. Au sud, c'est l'artificialité qui prescrit la géographie lacustre.



Figure 18: Carte de la répartition des plans d'eau en Europe (Bartout et Touchart, 2013)

La dualité entre lacs naturels et artificiels dicte grand nombre des orientations de politique publique nationales. Par leur caractère artificiel, certains plans d'eau souffrent d'un manque de considération alors que leur intérêt de biodiversité peut être similaire aux plans d'eau naturels (Bubíková & Hrivnák, 2018). Dans des régions où la naturalité de l'origine du lac domine, il existe tout de même de nombreuses actions anthropiques perturbant ces milieux. Malgré leur très grande taille, les lacs de dépôt morainiques du nord-est de la Pologne ont subi de grandes campagnes d'artificialisation afin de gérer ces espaces à des fins anthropiques. Des systèmes de sortie d'eau, semblables à ceux présents dans nos étangs français ont été installés dans de nombreux lacs de Warmie, dont un des pionniers fut le lac de Kortowo (Olszewski 1971, Dunalska, 2002, Dunalska *et al.*, 2007) situé sur le campus universitaire de la ville D'Olsztyn, au nord-est de la Pologne. Au nord-est de l'Europe, en Estonie, les plans d'eau naturels de petite taille sont fortement représentés²⁰, à la limite entre la mare et, ce qu'en France, nous appellerions étang. Ces plans d'eau dont l'origine est naturelle, liée à l'héritage glaciaire du pays, sont fortement modifiés par les actions humaines diverses. Le pompage de l'eau des nappes, les pratiques agricoles intensives,

²⁰En nombre, car pour la limnité ou la superficie, la présence du lac Peipsi, avec une superficie de plus de 3500km² entre l'Estonie et la Russie, domine largement.

l'industrialisation ou encore les activités minières émettent de fortes pressions sur ces plans d'eau. Leur taille et leur superficie est à la limite de celles de l'étang. Ces lacs des hautes latitudes ont-ils pour autant un fonctionnement très différent des étangs qui ornent les paysages français ?

2.2.4.1 La région des lacs de Kurtna propice à une étude géographique des influences anthropiques sur le milieu lacustre

La région étudiée est celle de Kurtna, située au nord-est de l'Estonie, non loin de la frontière Russe dans une région de tourbe et de forêt d'Alutaguse. C'est une région minière et industrielle, dans laquelle se situe la réserve naturelle de Kurtna, région de forte concentration de petits lacs récemment formés lors de la dernière glaciation continentale, il y a environ 12 200- 12 300 ans (Punning *et al.*, 1997). Le gouvernement soviétique instaura cette région lacustre de *zapovednik* paysager en 1987 (Touchart *et al.*, 2013). La zone réduite à moins de 30 km² ne comporte pas moins d'une quarantaine de lacs (Figure 19), avec une limnité estimée à 6,9 %.

Les modelés de la réserve sont fluviaux-glaciaires, avec la présence de dépôts de torrents sous-glaciaire, ayant formé une levée (ô) à l'extrême sud de la réserve. Le territoire de la réserve est formé d'un champ de Kames boisés (Ilomets, 1994, cité par Touchart *et al.*, 2013), soit des collines de sable de forme arrondie. Au pied de ces collines, les dépressions sont occupées par des lacs ou marais, alimentés par la nappe lorsque le niveau est supérieur au plancher de la dépression (Touchart, 2017).

La région lacustre la plus dense du pays est menacée par la présence de pressions majeures à proximité immédiate de la réserve (Figure 19: Carte de localisation de la réserve de Kurtna et des activités anthropiques avoisinantes (Touchart *et al.*, 2013)). La tourbe y est prélevée par drainage intensif des parcelles, le sable y est extrait dans des carrières à ciel ouvert, ainsi que l'exploitation minière de schistes bitumineux, première source énergétique du pays. Le risque est important à la fois pour les éléments naturels tels que les lacs, mais également pour les aspects sociaux, la réserve étant une zone de pompage d'eau potable assez importante et une zone touristique. L'abaissement de la nappe entraîne une diminution du volume d'eau des lacs, dont la grande majorité sont dépendant de la variation du niveau d'eau souterraine. Les évolutions des niveaux d'eau des lacs ainsi que de leurs relations avec la nappe ont largement été étudiées ces dernières années (Vainu & Terasmaa, 2016). En plus

de la variation de niveau d'eau, c'est la qualité de l'eau des lacs qui pose problème. La création de canaux de rejet d'eau des diverses zones minières et d'exploitation de tourbe directement dans certains lacs (Nommejärv, Särgjärv, Ahvenjärv et Konsu) font de ces derniers de véritables zones d'épuration (Vesiloo, 1987, cité par Punning *et al.*, 1997).

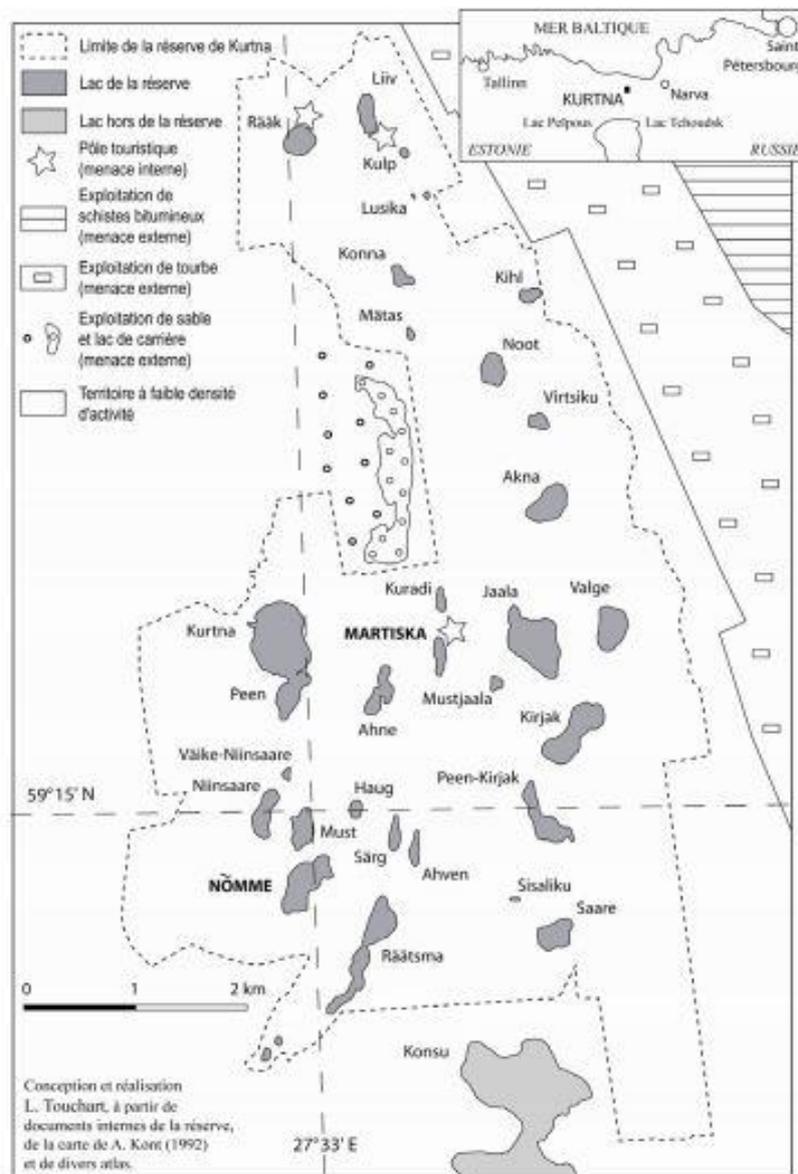


Figure 19: Carte de localisation de la réserve de Kurtina et des activités anthropiques avoisinantes (Touchart *et al.*, 2013)

Dans la réserve de Kurtina, deux lacs particulièrement différents ont été étudiés, dont la méthodologie d'analyse spatiale de la température et conductivités a apporté des connaissances complémentaires à différentes études. Les deux lacs présentés ci-dessous ont également été analysés lors du programme franco-estonien Parrot (2014-2016).

2.2.4.2 L'étude d'un lac de culot glaciaire dans les échanges entre la nappe et le plan d'eau

Le premier, le lac Martiska (2,7 ha de superficie, profondeur maximale de 7,4 m), est localisé dans un bassin fermé, alimenté par la nappe. Le lac est situé à proximité immédiate d'une station de pompage des eaux de la nappe (Figure 20). Les variations de niveau du lac varient fortement depuis le prélèvement d'eau de l'aquifère (Vainu & Terasmaa, 2016). Alimenté uniquement par les eaux de ruissellement, très réduites, et celles de la nappe, l'analyse thermique et de conductivité du lac, à une échelle spatiale fine a été effectuée afin de voir et caractériser les échanges entre le lac et la nappe. L'étude a été effectuée en hiver, avec prise en glace de plus de 40 cm sur le lac, ainsi que tout au long du printemps, à l'aide du CastAway. **Cette méthodologie permet de déceler des zones d'influences majeures de la nappe, et de compléter les études réalisées sur la circulation des eaux souterraines dans la région de Kurtna (Vainu & Terasmaa, 2016) et mettre en avant les hétérogénéités spatiales liées à une arrivée d'eau souterraine.**

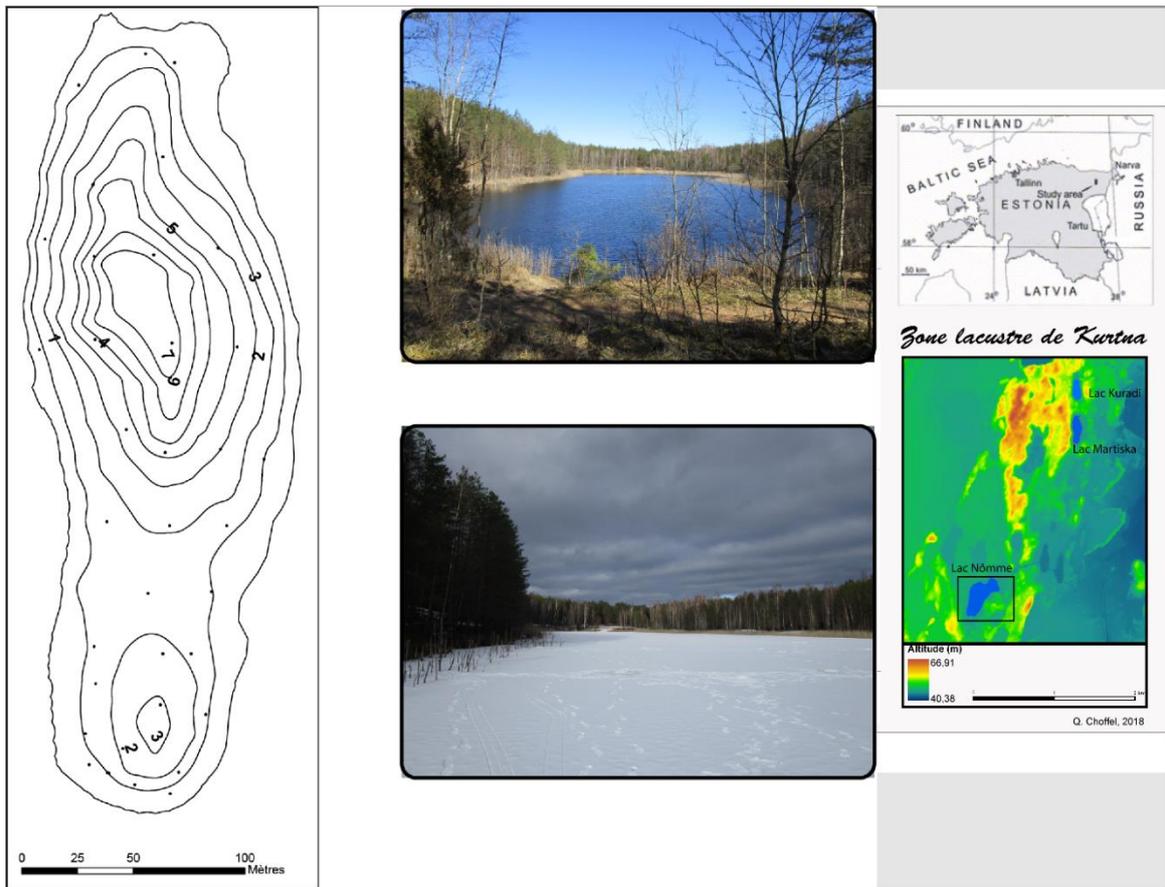


Figure 20: Carte bathymétrique du lac Martiska. Photographies du lac avec prise en glace hivernale et durant l'été. Q. Choffel, 2017

2.2.4.3 Etude d'un lac dont la création d'un tributaire artificiel a perturbé son fonctionnement

Le second, le lac Nõmmejärv (16 ha de superficie, profondeur maximale de 5,5 m, Figure 21) est un lac mésotrophique alimenté par le canal de rejet des mines. Le lac possède un tributaire principal au sud, et un secondaire, de faible débit, sur sa rive ouest. L'émissaire se situe au niveau du nord-est, se jetant ensuite dans une série de lacs. La création de ce canal en 1970 a considérablement changé la structure chimique, biologique, sédimentaire et thermique du lac Nõmmejärv (Punning *et al.*, 1997). La forte concentration en sulfate (SO_4^{2-}) des eaux du canal entraîne des valeurs élevées de conductivité des eaux arrivant dans le lac. L'étude spatiale de forte résolution de la température et de la conductivité au sein du lac a été effectuée, à l'aide du Castaway comme pour le cas précédent. **Cette méthodologie a permis l'analyse des échanges entre un canal (à forte conductivité) et un lac, et ainsi de connaître les zones du plan d'eau perturbées par l'élaboration du canal.**

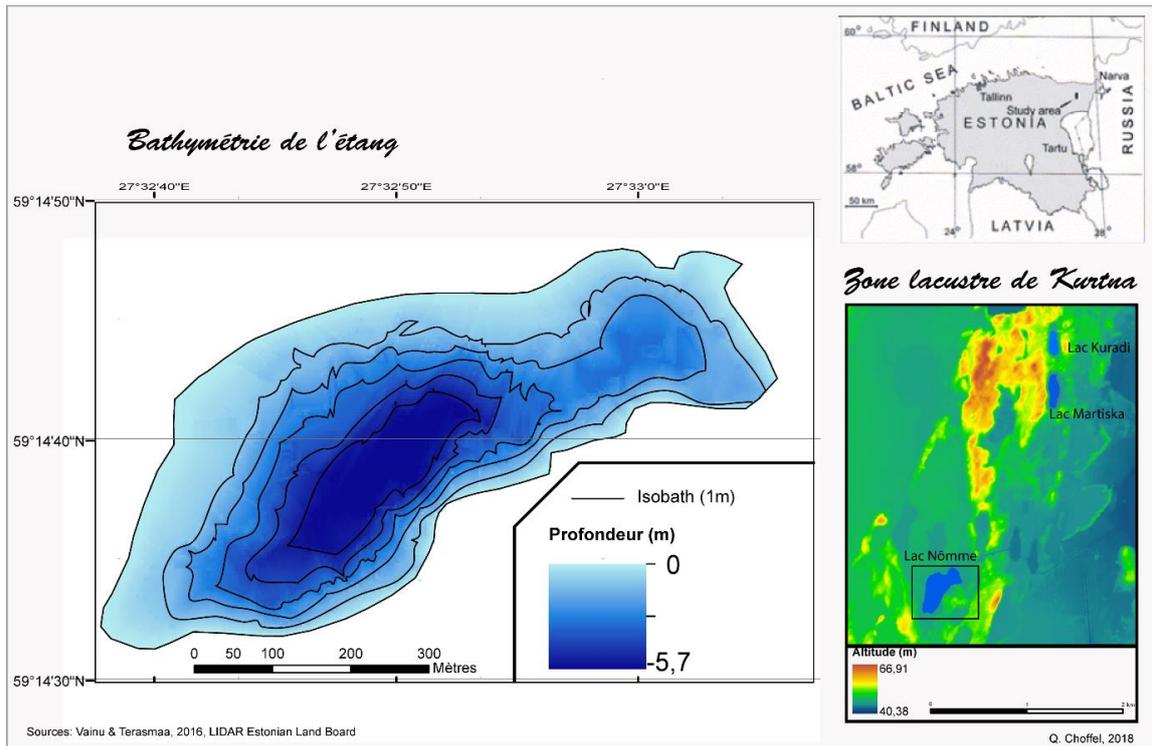


Figure 21: Carte bathymétrique du lac Nõmme. Données : Marko Vainu.. Q. Choffel, 2017

Le lac Nõmme joue un rôle épurateur des eaux de rejets de mines. Cette étude s'insère dans un programme en cours dirigé par l'université de Tallinn sur l'impact des rejets miniers divers sur les lacs (sous la direction de J. Terasmaa). L'étude de cultures des territoires de l'eau estoniens laisse quelques questions en suspens. Entre une typicité ouest et centrale-européenne de création d'étangs sur cours d'eau et celles nord-européennes de création de canal au sein du lac, quelles peuvent être les similarités ? L'approche estonienne par la construction d'un canal tributaire et émissaire, postérieure au lac, renforce la vision limnocentrée de l'analyse thermique d'un plan d'eau, peu présente en France.

Conclusion de la partie I

Le bilan thermique a été inventé pour les lacs mais c'est en étudiant les étangs qu'il prend tout son sens. Le bilan thermique, quelque peu théorique pour les lacs, devient réel pour les étangs, de par leur caractère vidangeable et leur morphologie d'origine anthropique, puisqu'ils peuvent déverser la totalité de leurs calories dans le cours d'eau. L'étude des étangs ouvre une nouvelle perspective plus appliquée du bilan thermique avec la prise en compte de la zonation de la température, plus facilement mesurable par la taille laboratoire des étangs comparée aux grands lacs. Par leur localisation sur cours d'eau, généralement en tête de bassin, ils sont au cœur de problématiques environnementales actuelles. Leurs effets négatifs sur le cours d'eau sont pointés du doigt, vu qu'ils sont considérés *de facto* comme des perturbateurs ou des ruptures dans la continuité du cours d'eau. La connaissance de leur fonctionnement interne est nécessaire à la compréhension de leur impact négatif mais également de leur effet bénéfique sur le cours d'eau. Encore faut-il, dans une démarche de géographie limnologique, placer le plan d'eau au centre du système, et non pas comme unique source ou réceptacle de pollution.

Cette première partie a montré tout l'intérêt de l'utilisation pleine et entière du bilan thermique des plans d'eau, selon une approche géographique, laquelle sait, d'une part ajouter la zonation horizontale des températures à leur étagement vertical, d'autre part, à travers les changements d'échelles, prendre en compte toute la gamme de taille et d'origine des plans d'eau, sans négliger ni les plus petits d'entre eux ni ceux d'origine artificielle. La mise au point d'un bilan thermique adapté aux étangs offre la possibilité de bloquer la variable de la petite taille et de tenter d'élargir la méthode aux petits plans d'eau d'origine naturelle. L'une des principales différences se trouvant être que les étangs, qui ont été construits avec un fond en général étanche, n'ont habituellement pas d'échange hydrologique et calorifique avec les eaux souterraines, nous avons choisi d'ajouter aux trois terrains d'étude français principaux de petits lacs de culot de glace morte estoniens, qui ont justement la particularité de posséder des liens extrêmement forts avec la nappe souterraine.

Au-delà de l'intérêt, démontré et contextualisé, de l'utilisation du bilan thermique dans toutes ses possibilités, la première partie a aussi fait ressortir les limites de cet outil.

Cela pose la question de l'éventuel besoin de créer d'autres indicateurs, qui seraient complémentaires de celui-ci.

C'est pourquoi les parties suivantes devront d'abord s'attacher à exploiter au mieux toutes les facettes du bilan thermique, d'une manière géographique, en insistant sur les spécificités de son utilisation en étang, en ajoutant la composante horizontale pour intégrer le volume des masses d'eau, et en positionnant le plan d'eau au centre des échanges avec l'extérieur. Se faisant, la thèse ne pourra se soustraire à envisager la mise au point de nouveaux indicateurs.

**Partie II : Le bilan thermique stagnustre, méthodologie
de calcul et analyse de trois étangs**

Le choix de l'étude limnogéographique s'est porté sur les petits plans d'eau artificiels peu profonds dont les dimensions permettent, à coût égal, des analyses beaucoup plus fines qu'en lac, profitant d'un maillage de mesures nettement plus serré. Nous avons opté pour les mesures *in situ*, sur plusieurs années, rendues possibles par la dimension spatiale raisonnable des étangs ne dépassant que rarement la dizaine d'hectares. Les mesures de températures à un pas de temps horaire, préférable pour les plans d'eau polymictiques (Touchart, 2001, 2007) et en cours d'eau (Webb & Walling, 1986), mettent à notre disposition un nombre conséquent de données. L'étude de trois étangs et de cours d'eau en continu sur plusieurs années permet l'exploitation de plus d'un million de données thermiques horaires inédites. L'ensemble des données a été analysé par le biais du bilan thermique, permettant une première analyse en trois dimensions avec l'utilisation du volume de la masse d'eau. L'élément de base incontournable de l'étude, comme celui de tout limnologue depuis le 17^{ème} siècle, est le thermomètre. Devenu thermomètre enregistreur au fil du temps et de la technologie, il permet un diagnostic thermique du plan d'eau complet. Il est complété dans l'étude par des mesures physico chimiques ponctuelles ou en continu afin de mieux comprendre le fonctionnement stagnustre et les échanges avec les cours d'eau tributaires et émissaires.

Les études sur le bilan thermique étant généralement réservées aux lacs, à l'exception de rares études stagnustres (Touchart, 2016), la question principale de la partie 2 se trouve être la suivante : en quoi le bilan thermique des étangs se distingue-t-il de celui des lacs ? Nous nous proposons de répondre à ce problème selon un emboîtement d'échelles.

Nous tenterons d'abord d'établir dans un sens non strictement mathématique, un « modèle étang », Synthétisant les résultats de nos trois terrains d'étude. Ce modèle étang sera pensé comme une synthèse représentative du fonctionnement thermique du milieu stagnustre. Conférant à l'étude des trois étangs de notre terrain un caractère significatif, il sera considéré comme un archétype de la dynamique thermique d'étangs de morphologies variées. C'est cette tentative de généralisation qui permettra de dissocier le fonctionnement global de ces petits plans d'eau de celui des lacs, le premier étant encore trop souvent considéré dans la littérature scientifique comme une troncature du second. Puis nous essaierons de caractériser les différences entre les étangs pelliculaires et ceux profonds, esquissant ainsi une amorce de typologie adaptée à notre problématique. Enfin, nous

tenterons d'extrapoler le bilan thermique des petits plans d'eau à une échelle régionale, en créant une nouvelle équation basée sur celle de Gorham (1964) pour les grands lacs profonds, et Touchart (2016) sur quelques étangs limousins. Il devrait alors être possible de cartographier la contenance calorifique d'une région d'étangs et ainsi la confronter avec celle des grands lacs profonds afin de vérifier l'idée générale d'une forte capacité de déversement calorifique des étangs.

Dans chapitre 3, l'ensemble des méthodes et instruments utilisés seront présentés, à la fois pour le calcul du bilan thermique, adapté aux petits plans d'eau peu profonds, ainsi que pour le suivi de la qualité de l'eau en étang et cours d'eau. Puisque le choix s'est porté sur l'utilisation de données *in situ*, il s'agira dans ce chapitre de justifier l'apport de ces données et leurs méthodes d'exploitations, à l'aide d'outils de géomatique et de questionner la pertinence d'indicateurs lacustres en milieu stagnestre.

Nous procéderons, dans ce quatrième chapitre, à la création d'un « modèle étang », en opposition à celui lacustre, en intégrant les données des trois étangs à morphologies variées, l'un petit et profond, les deux autres plus pelliculaires. Nous verrons l'évolution thermique de ce milieu à différentes échelles de temps, couplée à celle de la quantité d'oxygène, ainsi que la capacité de l'étang à se stratifier. Afin de ne pas négliger l'importance de la morphologie de l'étang dans son fonctionnement thermique, nous nous pencherons sur l'étude séparée entre les étangs profonds et ceux pelliculaires. Nous discuterons enfin la possibilité d'évaluer la connaissance du bilan thermique des petits plans d'eau à partir de leur profondeur moyenne, et ainsi estimer leur représentativité au sein d'une région.

Chapitre 3 : Méthodes et outils de mesures de géographie limnologique

3.1 Instruments de mesures thermique, hydrologique et météorologique

3.1.1 Les mesures thermiques : un indicateur fiable du suivi de la qualité des eaux

3.1.1.1 L'intérêt de la prise de mesures thermiques en continu dans les étangs

Les mesures thermiques en continu ont été effectuées dans les trois étangs étudiés, ainsi que dans le cours d'eau de la Zinsel du Nord et ses affluents.

Dans sa composante verticale, la faible profondeur ne sous-entend pas l'absence de stratification mais la présence de saut thermiques à des résolutions plus fines qu'en lac (Touchart, 2002, 2016). En étang, la taille des strates thermiques, nommées *épistagnion*, *métastagnion* et *hypostagnion* est réduite à quelques centimètres. L'objectif est de comprendre le fonctionnement thermique de chacune de ces couches lors de l'établissement d'une stratification, inverse ou directe, et du plan d'eau dans son ensemble lors des phases d'homothermie. L'utilisation d'un écart vertical trop grand peut entraîner le manque de détection des particularités thermiques en étang, telles que les stratifications thermiques secondaires ou éphémères sur les premiers centimètres (Touchart, 2001, 2007).

Sur le Léman, Forel a effectué des mesures tous les dix mètres, pour ce lac de plus de 300 m de profondeur maximale (Forel, 1892). Spence et son équipe (2003) ont quant à eux utilisé des mesures tous les 70 cm pour le lac Skeeter, profond de 6,6 m, plus proche de celles des étangs les plus profonds. Pour les étangs étudiés ici, l'écart entre les mesures verticales sera de 25 cm, dont la profondeur maximale s'étend de 2,5 à 4,25 m. La recherche de la précision proche des 25 cm, du moins pour les premiers mètres, est depuis longtemps utilisée par L. Touchart et ses doctorants (Touchart, 2002, 2007, Savy, 2006, Brunaud, 2007, Al Domany, 2017) et apporte des résultats satisfaisants et cohérents sur les étangs.

Dans les milieux stagnants, les thermomètres enregistreurs sont installés sur des chaînes galvanisées en 6 ou 8 mm. Au sommet, une bouée assure la flottaison tandis que le poids de la chaîne permet de les maintenir en place de façon verticale, sans l'ajout de poids-

mort (Figure 22). Cette méthodologie est utilisée depuis de nombreuses années en milieu lacustre et stagnustre (Touchart, 2001). Les thermomètres sont répartis tous les 25 cm sur la chaîne, de la surface jusqu'à 1,5m de profondeur, puis tous les 50cm jusqu'au fond.

Les thermomètres enregistreurs sont des *Tinytag Data Loggers, Tinytag Aquatic 2*²¹ et des *Hobo water temp Pro v2*. Les premiers sont des thermomètres de précision de 0,2 °C selon le constructeur Gemini, mais nos propres calibrations avec un thermomètre Lufft C100 à résistance de platine en montage quatre fils, à précision au centième de degré garantie par un certificat du service de métrologie d'Avantec, ont montré que les instruments neufs étaient à 0,15 °C près, ceux de plusieurs années d'âge étant en moyenne à 0,37 °C près (Touchart & Bartout, 2010). Les thermomètres Hobo ont des caractéristiques similaires, avec une précision de l'ordre de 0,21 °C et une résolution de 0,02 °C selon le constructeur. La stabilité des thermomètres est d'environ 0,1 °C par an, ce qui signifie ici un écart maximal possible de moins de 0,5°C étant donné l'utilisation d'une grande majorité de thermomètres neufs²², dont les plus anciens ont 5 ans. Lors de repérage d'anomalies d'un thermomètre, facilement visibles en plan d'eau lors des périodes d'homothermie, celui-ci est immédiatement remplacé. L'ensemble des données a été vérifié plusieurs fois et les anomalies présentes ont été corrigées. Lors de doutes, les données ne sont pas prises en compte dans l'analyse des résultats. Nous bénéficions, à la fin de cette étude, de 994 153 heures de données thermiques en plan d'eau et 143 028 heures en cours d'eau, pour un total de **1 137 181** données horaires inédites.

²¹Seuls deux Tinytag Aquatic 2 ont été utilisés, récupérés suite à une ancienne étude les utilisant.

²²L'achat de nombreux thermomètres a été rendu possible suite au projet en commun avec le laboratoire LIEC de l'université de Lorraine et le PNR des Vosges du Nord, dont l'Agence de l'Eau Rhin Meuse est le financeur. Nous avons également bénéficié du prêt de 10 thermomètres Hobo par le pôle Plan d'eau Irstea-AFB d'Aix en Provence.

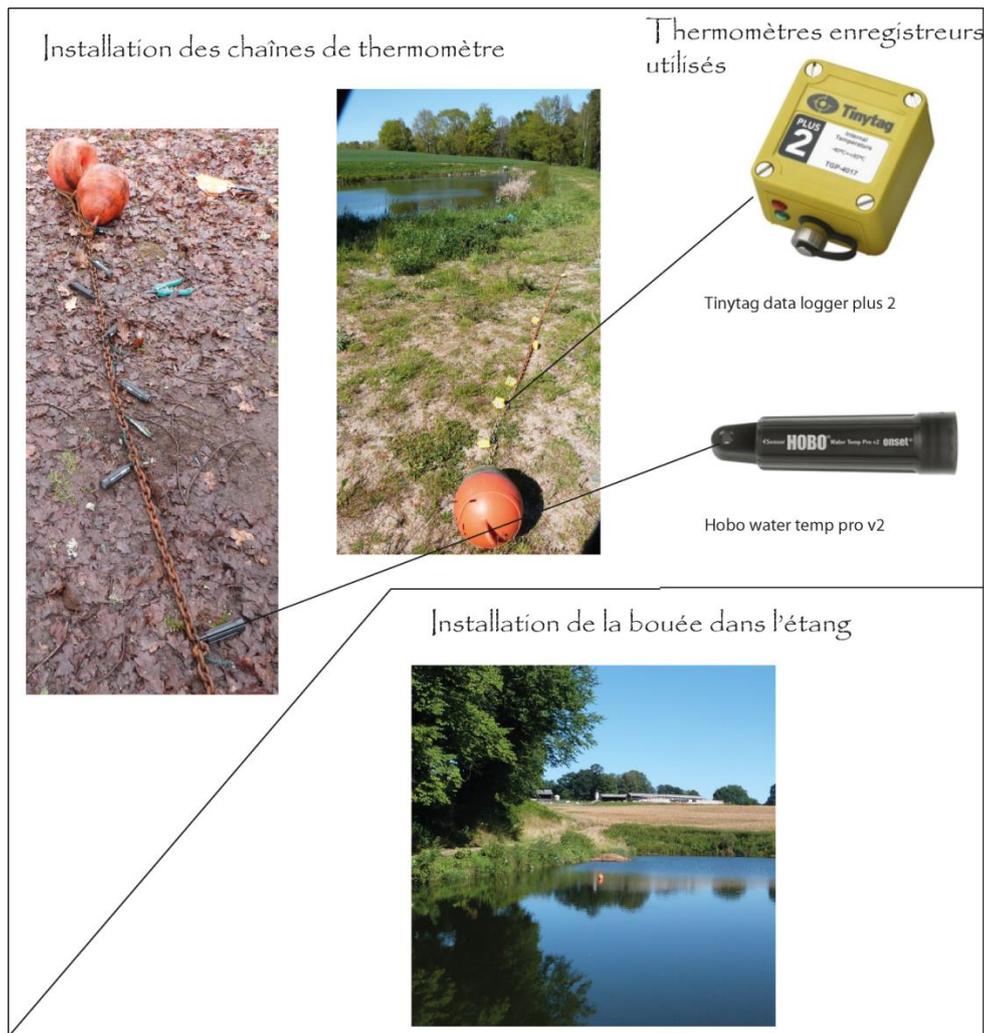


Figure 22: Méthodologie de mesures thermiques en continu. Q. Choffel, 2018

Les thermomètres enregistrent la température de l'eau à la fréquence horaire permettant d'obtenir un résultat suffisamment précis afin d'observer la plupart des phénomènes, tout en assurant un suivi sur du long terme (Webb & Walling, 1988, Touchart, 2002, 2016). L'approche méthodologique de mesures en continu a été préférée à celle ponctuelle. Cette dernière pouvant néanmoins compléter la première. Grâce au suivi en continu, l'ensemble des données peut être analysé à l'échelle annuelle, mensuelle, journalière et horaire, afin de ne pas se limiter à des moyennes ou à une seule valeur. L'utilisation de données en continu permet la connaissance des phénomènes nocturnes. De fortes températures réparties sur l'ensemble du cycle nyctéméral peuvent avoir des conséquences sur le milieu et la faune aquatique. L'absence de données nocturnes ou hivernales peut fausser la compréhension du milieu et les effets sur les espèces animales et végétales (Gorham, 1964). Les données en continu favorisent une compréhension globale

des systèmes hydrologiques étudiés sur l'année complète et non suivant des moments ou cycles particuliers. Lorsque l'on étudie la température des milieux aquatiques, l'été est la période pendant laquelle les écarts thermiques sont les plus grands et facilement détectables, si bien que nombre d'études ou de rapports techniques ne s'appuient que sur des données estivales, sur un laps de temps court et aux périodes les plus chaudes. Pourtant, le lien entre la température de l'eau et le déclenchement de la reproduction est un exemple fondamental dans le besoin de données hivernales et printanières. Le réchauffement de l'eau au début du printemps va déclencher la reproduction chez certaines espèces, et leur grande migration pour d'autres (Tissot & Souchon, 2011).

3.1.1.2 L'apport complémentaire des mesures ponctuelles

Les mesures thermiques en continu bénéficient d'une grande précision temporelle essentielle sur des plans d'eau polymictiques, mais peut être accusée d'une précision spatiale limitée dans son horizontalité. La présence de quatre à cinq bouées dans de grands étangs ne permet pas d'étudier l'ensemble des flux thermiques et des discontinuités de la thermocline. Au cours de l'étude, des instruments de mesures ponctuelles ont été ajoutés afin d'améliorer la représentation spatiale des données. La sonde utilisée est un CastAway CTD, permettant d'effectuer des profils thermiques mais aussi de conductivité, salinité et vitesse du son, de manière très rapide. Lors de la plongée du CastAway CTD dans l'eau, celui-ci effectue un profil avec une mesure de données toutes les 0,20 secondes, dans sa phase montante et descendante. Il est doté d'un GPS d'une précision inférieure à 10 m. La gamme de mesure thermique s'étend de -5 à + 45°C, avec une précision de 0,05 °C et une résolution de 1 µs/cm. Le temps d'adaptation est très faible et permet d'avoir des données correctes dès sa mise en eau. Cette rapidité de mesures permet d'effectuer de nombreux points sur un même lac, faisant varier la précision verticale et horizontale. Après vérifications sur nos données thermiques fixes, installées sur les bouées, il a été choisi d'opter pour la récupération des données lors de la phase montante, alors plus précises d'environ 0,2 °C. Surtout, les erreurs mesurées sont les plus importantes à la surface pour les données descendantes (0,75°C en moyenne), dues à l'influence possible de la température de l'air lors de la mise à l'eau. L'influence peut être encore plus forte lors de mesures sous glace, où la surface gelée peut influencer les données descendantes. Un logiciel est fourni avec la sonde CastAway, permettant les échanges de données avec l'ordinateur à l'aide d'interface

bluetooth. Le logiciel permet un aperçu géographique des mesures effectuées sur fond d'Open Street Map. Un onglet est destiné à l'aperçu du résultat sous forme de courbes de température, conductivité, densité ou salinité en fonction de la profondeur (Photo 9: Mesures à l'aide du CastAway en lac gelé (en haut à droite), cours d'eau (en bas à droite) et en étang (gauche). Clichés: Q. Choffel, opérateurs: F. Donati et Q. Choffel, 2018.).



Photo 9: Mesures à l'aide du CastAway en lac gelé (en haut à droite), cours d'eau (en bas à droite) et en étang (gauche). Clichés: Q. Choffel, opérateurs: F. Donati et Q. Choffel, 2018.

La sonde CastAway CTD est avantageée par son temps de réponse très réduit, permettant d'effectuer des mesures en quelques secondes. Les étangs étudiés ont été sondés occasionnellement afin de compléter les données thermiques en continu, présentes en des points fixes. Des mesures ont été effectuées avec une forte résolution spatiale sur l'ensemble du plan d'eau. Certaines campagnes de relevés de mesures thermiques et de conductivité ont permis d'établir 85 points de mesure sur le lac Martiska, au nord-est de l'Estonie, soit environ 31 points de mesure à l'hectare. Les mesures ont été densément effectuées dans la partie sud du lac, où les probabilités d'échanges avec la nappe ont ressurgi lors d'études hydrologiques antérieures (Vainu & Terasmaa, 2016). A proximité, sur le lac Nõmme, dont la création d'un affluent anthropique a modifié le fonctionnement, une quarantaine de mesures ont été effectuées lors de chaque campagne de juin et juillet 2017, soit un peu plus de 3 points à l'hectare lors de chaque campagne. En France, les étangs de la

129

Ramade, de Baerenthal et de Rilhac ont également bénéficié de mesures thermiques ponctuelles à l'aide du CastAway. Les quelques points ont permis, notamment sur l'étang de Rilhac, de bénéficier d'une meilleure précision verticale et horizontale, en complément des mesures continues. Sur le petit étang de la Haute-Vienne, une vingtaine de sondages ont été effectués lors des campagnes de 2017 et 2018, soit une précision d'environ 50 points à l'hectare (Figure 23).

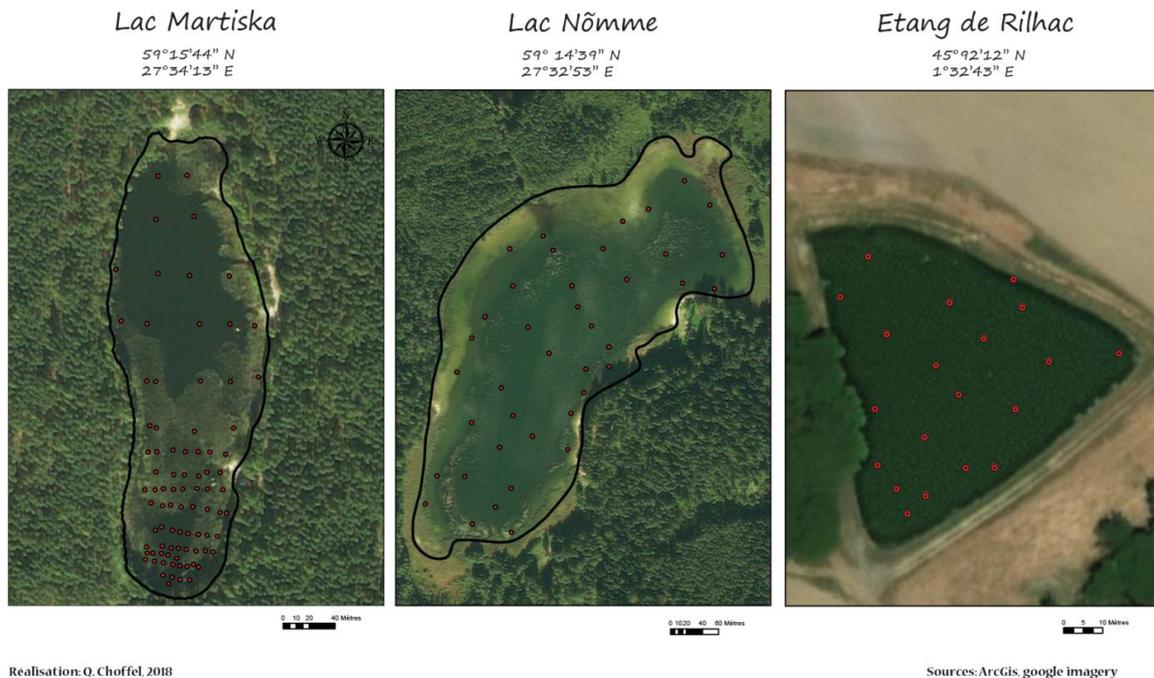


Figure 23: Représentation spatiale de la résolution de mesure ponctuelles

Le complément ponctuel de mesures de grande précision spatiale verticale et horizontale permet d'analyser l'ensemble des discontinuités thermiques potentiellement non mesurées avec les chaînes de thermistors. L'ensemble du plan d'eau est sondé et la visualisation en trois dimensions permet l'analyse complète des échanges calorifiques.

3.1.2 Les mesures hydrologiques : élément essentiel à l'étude des échanges calorifiques entre les différentes masses d'eau

Les mesures hydrologiques sont complémentaires aux mesures thermiques dans le cadre du bilan thermique et des échanges calorifiques entre les cours d'eau et les plans d'eau. Des mesures ponctuelles en cours d'eau ajoutent une connaissance supplémentaire

des calories apportées aux étangs, ainsi que celles déversées par le milieu stagnastre. Dans l'aspect de la température seule, l'absence de connaissance sur le débit ou le volume ne permet pas réellement de modéliser les échanges calorifiques entre des éléments de volume différents. Le cas de la dérivation est un bon exemple, illustré par L. Touchart et P. Bartout (2011) puis C. Millot (2015) dont le débit dérivé doit être calculé afin de limiter les calories vers l'aval mais également d'assurer un écoulement suffisant dans l'étang et dans la dérivation.

Au sein des étangs de Baerenthal et de la Ramade, un suivi de l'évolution de la hauteur d'eau a été réalisé. La connaissance de l'évolution du niveau d'eau permet d'appliquer une contenance calorifique réelle ainsi que d'apporter des connaissances fondamentales à la dynamique thermique du plan d'eau, à savoir si des phases de stratification thermiques de l'étang sont influencées par des temps de rétention plus longs ou des arrivées d'eau conséquentes.

3.1.2.1 Variations de niveau d'eau des étangs

Les petits étangs ne bénéficiant pas d'arrivée d'eau superficielle permanente ont des variations de niveau dépendants de l'arrivée de nappe ou par ruissellement, et de la perte par évaporation, tandis que ceux sur cours d'eau dépendent principalement de la variation des débits entrants, même si les influences climatiques ont un impact sur leur volume en eau. Les étangs pelliculaires peuvent se trouver à sec en fin d'été, avec ou sans la présence de tributaires, lors de périodes de déficit hydrologique. L'étang connaît alors une variation importante de son volume, avec un marnage parfois conséquent. Cette variation a un impact sur la biologie (Dussart, 1966) mais aussi sur la physique du plan d'eau, sa capacité à se réchauffer rapidement ou à développer une stratification thermique, en lien avec le volume de la masse d'eau.

Un capteur de niveau a été installé dans les étangs de la Ramade et de Baerenthal. L'étang de Rilhac bénéficie d'une étude précise de son bilan hydrologique (Al Domany, 2017) sur l'année 2016. Sa position sur source entraîne peu de variations de niveau et nous jugeons les données, bien que sur une année différente de celle mesurée, cohérentes et suffisantes. L'enregistreur de niveau d'eau utilisé est un Hobo U20 Water Level, avec interface USB optique. Il est livré avec un certificat de calibrage accrédité NIST de précisions sur trois points de pression de l'étendue de mesures. L'enregistreur peut aller jusqu'à une profondeur de 9

m, soit de 0 à 270 kPa. La compensation de pression barométrique est effectuée avec la station météo Hobo à proximité immédiate de l'étang. Le cas échéant les valeurs de pression atmosphérique de la station Météo France la plus proche peuvent être utilisées. Le capteur bénéficie d'une sonde de pression ainsi que d'une sonde thermique. Le capteur de pression est installé sur une chaîne de thermomètres, au niveau du point le plus profond de l'étang, soit à la chaussée, à 1 m de profondeur.

L'étude de la variation du niveau d'eau permet de préciser le bilan thermique et de passer d'un bilan thermique théorique, figé sur le moment où a été réalisé la carte bathymétrique, à un bilan thermique concret et évolutif, variant selon le volume de l'étang. Il permet d'adapter le calcul de la contenance calorifique aux saisons. L'été est la saison la plus chaude, vouée à une contenance calorifique maximale. Cependant, son bilan réel est réduit par le volume diminué du plan d'eau durant les phases de fortes chaleurs, souvent synonymes de sécheresse ou d'étiage. L'ajustement par le volume permet une meilleure estimation des contenances calorifiques déversées vers l'aval. Il permet également de voir s'il existe un lien évident entre de faibles volumes d'eau et une stratification thermique importante.

3.1.2.2 Echanges fluviaux dans le calcul du bilan thermique lacustre

De nombreux étangs sont situés sur cours d'eau, ce qui signifie qu'ils bénéficient également d'un ou plusieurs tributaires, à l'exception de ceux situés sur source ou sur les versants, plus communément appelés retenues collinaires.

En tête de bassin, où sont localisés une grande majorité d'étangs, les petits cours d'eau subissent régulièrement des crues importantes, modifiant fortement leurs débits. Ces variations impactent le volume de l'étang et donc son bilan thermique. Il est important de souligner que les apports des affluents ne sont pas limités aux débits liquides mais également aux débits solides, nutriments et autres apports. Bien que la charge dissoute ou les nutriments puissent jouer un rôle secondaire dans la dynamique thermique, seule la mesure de débit liquide sera effectuée en cours d'eau.

Les débits des cours d'eau de tête de bassin sont peu suivis, ne bénéficiant que d'informations ponctuelles pour la plupart. Leur module, caractérisé par le débit moyen interannuel sur au moins 5 ans, est une information hydrologique essentielle manquante aux

têtes de bassin. Sur la vallée de la Zinsel du Nord, les débits ont été calculés en cours d'eau, ainsi qu'au niveau des sorties d'étangs pour établir un bilan thermique des émissaires complet et précis. Le suivi permanent du SYCOPARC des Vosges du Nord permet d'avoir des informations sur les débits des cours d'eau, complétées par nos soins pour les manquements géographiques ou temporels relatifs à l'étude.

Les débits ont été calculés à l'aide d'un courantomètre Flowtracker 2, muni d'un GPS intégré et d'une perche graduée. Sur chaque transect défini, un minimum de 30 points a été effectué. En fonction de la profondeur du chenal, un minimum de 1 point et un maximum de 6 points sont établis sur chaque verticale (Photo 10).



Photo 10: Mesures de débit en cours d'eau (opérateur F. Donati, Cliché: Q. Choffel) et courantomètre FlowTracker utilisé (Source: SoloStocks.com)

Le courantomètre calcule automatiquement les vitesses dans chaque verticale, une vitesse moyenne pour le transect, ainsi que le débit. Le calcul du débit peut être effectué selon trois méthodes, parmi les plus utilisées, soit la méthode de la section médiane, celle de la section moyenne ou la méthode japonaise. Notre choix s'est porté sur la méthode de la section moyenne, plus rapide à effectuer et plus adaptée aux petits cours d'eau. Cette méthode considère que la moyenne des vitesses moyennes mesurées sur deux verticales consécutives est représentative de la vitesse de l'écoulement sur la sous-section délimitée

par les deux verticales de mesure (Le Coz *et al.*, 2011). La vitesse moyenne de la section S_i est la moyenne entre les vitesses moyennes mesurées de deux verticales. Le débit Q_i pour chaque section est calculé selon la formule suivante :

$$(1) Q_i = V_i * S_i$$

Avec Q_i : débit liquide, V_i : vitesse moyenne et S_i : section mouillée

3.1.3 Les données météorologiques

Les liens entre la température de l'air et celles de l'eau sont étroits, à l'image des modèles stochastiques de prévision des températures utilisés en cours d'eau, basés sur la température de l'air (Caissie, 2006). La température du cours d'eau suit plusieurs cycles aux échelles annuelles à journalières, en lien avec les températures de l'air (Webb & Walling, 1993). A l'échelle annuelle elle suit une sinusoïdale de maximum estival et minimum hivernal sous nos latitudes (Ward, 1985). Le cycle journalier est influencé par la profondeur de l'eau, avec une amplitude diurne maximale pour les eaux les moins profondes (Cassie, 2006).

Le bilan thermique des milieux aquatiques est dominé par les échanges à l'interface eau/atmosphère. Les données météorologiques ont une grande importance sur la compréhension de la dynamique de ces systèmes. L'éloignement d'une station météorologique peut provoquer des erreurs importantes dans l'exploitation des données, perturbées par la topographie locale et un possible microclimat (Markfort *et al.*, 2010). Le vent est le paramètre le plus difficile à mesurer localement. Pour pallier ce possible inconvénient, deux stations météo ont été installées à proximité immédiate des étangs de la Ramade et de Baerenthal. L'étang de Rilhac bénéficie d'une proximité immédiate de la station Météo France de Limoges-Bellegarde, à environ 9km, ne nécessitant pas forcément une station supplémentaire à proximité du fait de l'effet réduit du vent sur le milieu stagnant. La première station, installée à proximité de l'étang de la Ramade est un Davis Vintage Pro 2, tandis qu'une station Hobo a été installée à proximité de l'étang de Baerenthal. Les caractéristiques mesurées pour les deux stations sont les suivantes :

- Précipitations (mm)
- Rayonnement solaire (W/m^2)
- Température ($^{\circ}C$)

- Humidité relative (%)
- Vitesse du vent et des rafales (m/s)
- Direction du vent (°)
- Point de rosée (°C)

L'ensemble des paramètres météorologiques sont mesurés à un pas de temps horaire afin de concorder avec les mesures thermiques. Le fonctionnement précis de la station Vantage Pro 2 a été détaillé par M. Al Domany dans sa thèse (2017), utilisant le même matériel lors de ses mesures de terrain (Photo 11: Matériel détaillé de mesure des conditions météorologiques (Al Domany, 2017) .

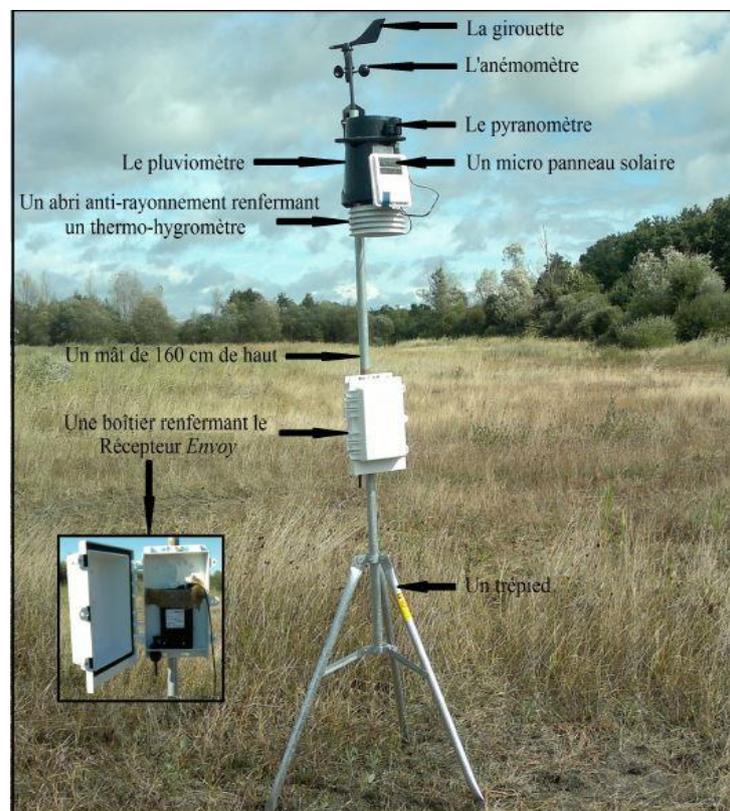


Photo 11: Matériel détaillé de mesure des conditions météorologiques (Al Domany, 2017)

3.1.3 Mesures complémentaires de la qualité de l'eau des plans d'eau

3.1.4.1 Mesures d'oxygène

En complément de celles thermiques, les études de répartition de l'oxygène dans la colonne d'eau des lacs stratifiés ont apporté de nombreuses informations aux limnologues sur la nature du lac et son degré d'eutrophisation (Goldman & Horne, 1983). La distribution

de l'oxygène dans les plans d'eau est un bilan entre les apports par l'atmosphère, la photosynthèse et les pertes dues aux oxydations chimiques et biologiques (Wetzel, 1983). La présence ou l'absence d'une stratification thermique joue un rôle majeur dans la distribution de l'oxygène dans la colonne d'eau (Hutchinson, 1957, Wetzel, 1983). Lors de phase de stratification thermique, celle-ci limite les échanges entre la surface, bénéficiant d'un apport d'oxygène de l'air, et la partie en dessous de la thermocline. En lac, l'hypolimnion subit saisonnièrement une anoxie de fond, liée aux stratifications saisonnières. Le statut trophique du plan d'eau influence la consommation d'oxygène des couches profondes. Les études sur les étangs montrent, ponctuellement, des taux d'oxygènes pouvant être très bas au fond, malgré les faibles profondeurs et les stratifications sur quelques jours (Touchart *et al.*, 2012). Pour de nombreuses espèces piscicoles, des teneurs en oxygène dissous inférieur à 2 mg/l ne permettent pas leur survie (Wetzel, 1983).

Le choix s'est porté ici sur l'étude de l'oxygène au sein de la colonne d'eau, avec un suivi en continu sur plusieurs mois. L'étang de Baerenthal a été équipé d'enregistreurs d'oxygène dissous Hobo U26-001 à membrane placés au niveau de la surface, à 1 m puis à 1,5 m de profondeur (Figure 24). Ce capteur permet de mesurer la quantité d'oxygène dissous, de 0 à 30 mg/L, avec une précision de 0,2 mg/l. Il permet également de mesurer la température, à la même résolution que les capteurs Hobo Water Pro 2. Les données sont prélevées à un pas de temps horaire sur plusieurs mois. L'utilisation de données en continu d'oxygène dissous apporte un avantage considérable sur la connaissance de la répartition d'oxygène sur la colonne d'eau de jour comme de nuit, en phase de stratification ou de brassage.

Fonctionnement et composants

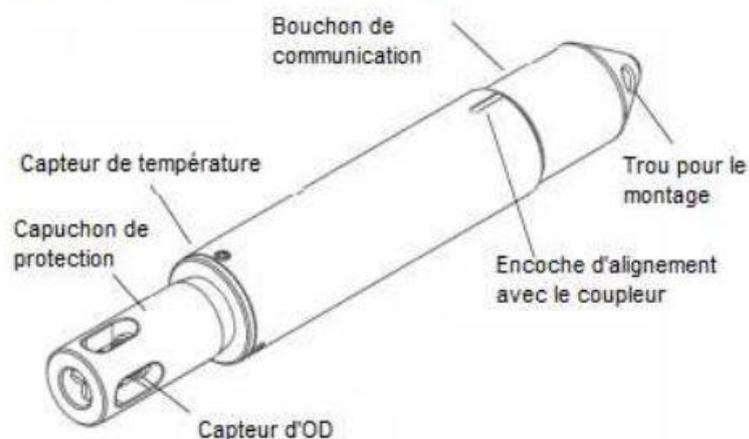


Figure 24: Capteur de mesure d'oxygène dissous, source : prosensor

L'absorption de la radiation solaire et sa dispersion au sein du lac a des effets majeurs sur la structure thermique, sa capacité à se stratifier ainsi que des mouvements internes à la masse d'eau (Wetzel, 1983). La productivité du plan d'eau dépend de la consommation de cette énergie et sa transformation en énergie potentielle par réactions chimiques. Une partie de la radiation solaire traversant la colonne d'eau est transformée en chaleur par le phénomène d'absorption (Horne & Goldman, 1983). L'absorption n'est pas uniquement affectée par l'eau du lac mais également par les matières en suspension. La concentration en composants organiques dissous dans la colonne d'eau influence directement l'absorption lumineuse. En comparant plusieurs lacs étatsuniens avec de l'eau distillée, James & Birge ont démontré que la capacité d'absorption du lac en lumière UV augmentait graduellement avec la concentration en matière organique dissoute (James & Birge, 1938). L'atténuation de la lumière en fonction de la profondeur est rapide, accélérée par la présence d'algues ou de bactéries. La grande majorité de la radiation solaire est absorbée dès les premiers centimètres. La transparence est un aperçu de la profondeur euphotique, soit la profondeur jusqu'à laquelle la colonne d'eau reçoit de l'énergie solaire.

Les mesures de transparence ont été effectuées avec la méthode du disque de Secchi. Cette méthode a été scientifiquement conventionnée par le jésuite Angelo Secchi en 1865, suite à ses mesures sur la Méditerranée. Elle consiste à plonger un disque d'environ 20 cm de diamètre²³ et composé de triangles noirs et blanc (Wetzel & Likens, 1979), dans le plan d'eau. Les mesures sont prises lors de la descente, à la profondeur où le disque disparaît, ainsi qu'à la remontée, lorsqu'il apparaît à nouveau, la moyenne des deux donnant la valeur de profondeur de Secchi. Les données de profondeur du disque de Secchi s'étendent de quelques cm pour les étangs et lacs à forte productivité, à des dizaines de mètres de profondeur pour les lacs les plus clairs et profonds. Cette méthode est la plus commune et la plus facile pour avoir une idée de la transparence de l'eau. En revanche, elle ne manque pas de défauts. La valeur de profondeur de Secchi peut être influencée par l'œil de l'observateur, ainsi que par des conditions météorologiques. Il est préférable ainsi de procéder au même

²³Les questions liées à la taille restent controversées, certains auteurs préconisant 20 à 30 cm (Forel, 1895), d'autres des disques de 30 cm (Dussart, 1992) ou encore 25 cm (Findenegg, 1935). La taille du disque peut influencer la profondeur à laquelle il disparaît. Cependant, cette marge d'erreur est jugée inférieure à la méthode générale très dépendante de la vue de l'observateur (Touchart, 2002).

point, avec la même personne. Si possible, il est également préférable de respecter un horaire similaire lors de points de mesure, au plus proche de midi (Wetzel & Likens, 1983). La valeur de mesure du disque de Secchi est essentiellement une fonction de la réflexion de la lumière à partir de la surface, influencée par les caractéristiques de l'eau mais également par la présence de matières dissoutes ou en suspension. La productivité du plan d'eau joue un rôle majeur dans la transparence de l'eau. Les lacs pelliculaires ainsi que les étangs ont une forte productivité (Dussart, 1966), modifiant les caractéristiques lumineuses et donc thermiques du plan d'eau.

L'ensemble des mesures et des outils utilisés sont fondamentaux en géographie limnologique et permettent le calcul de bilans thermiques lacustres et fluviaux, et ainsi de comparer les éléments hydrologiques entre eux et avec les conditions météorologiques. Ces éléments sont complétés par des outils géomatiques afin de traiter, classer, analyser et cartographier l'ensemble des données à disposition.

3.1 Méthodologie de mesure du bilan thermique stagnustre

Une méthodologie de calcul du bilan thermique a été établie pour cette étude en s'appuyant sur celle développée pour les lacs (Forel, 1892, Hutchinson, 1957, Ragotzkie, 1978) adaptée aux particularités des étangs (Touchart, 2016). Cette particularité réside dans la très faible profondeur d'eau obligeant le chercheur à augmenter la précision des mesures thermiques et bathymétriques.

3.2.1 Methodologie de mesure basée sur celle lacustre

Le bilan thermique, développé par Forel (1892) sur le lac Léman, est la soustraction du minimum au maximum annuel de contenance calorifique d'un plan d'eau. Il est un outil synthétique de l'ensemble des particularités thermiques du plan d'eau caractérisé par les échanges externes et internes à la masse d'eau. Les calories sont issues de la multiplication du volume d'eau par la température selon la méthodologie présentée.

Le calcul du volume des strates et de la bathymétrie

La méthodologie de calcul consiste à croiser les données thermiques avec les données volumétriques issues de la bathymétrie. Une campagne de mesure bathymétrique précise est nécessaire pour la connaissance précise des volumes d'eau de chaque strate. Pour les deux grands étangs, la bathymétrie a été réalisée par des prestataires extérieurs (Aquabio

138

pour la Ramade, le Ried Bleu pour Baerenthal) à l'aide d'échosondeur tandis qu'elle a été effectuée par nos soins pour le petit étang de Rilhac, à l'aide d'une perche graduée (Al Domany, 2017).

Les strates sont découpées, à l'aide d'outils SIG, en fonction de la localisation des thermomètres. Chaque thermomètre obtient une mesure représentative de la strate où il se situe, c'est-à-dire au centre de la couche de volume. Les thermomètres sont localisés tous les 25 cm de profondeur de la surface à 1,5 m, puis tous les 50 cm jusqu'au fond. Le volume de chaque strate d'eau est multiplié par sa température représentative. L'étang est alors disséqué en plusieurs masses d'eau verticales de volumes distincts (Figure 25).

Bathymétrie

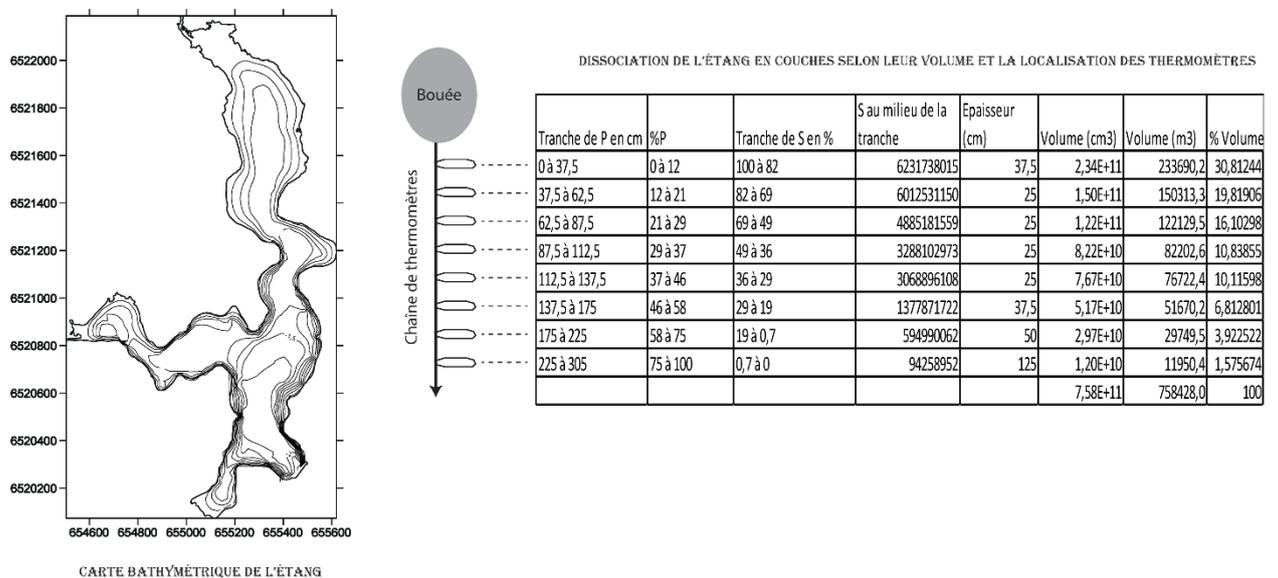


Figure 25: Méthodologie de découpage des strates volumiques en étang. Q. Choffel, 2016

De la bathymétrie à la contenance calorifique

Une fois la bathymétrie effectuée et l'étang découpé en strates de volume connu, les données thermiques horaires peuvent être ajoutées au calcul afin d'obtenir une contenance calorifique horaire. Pour une strate volumétrique donnée, on a une valeur thermique associée (Figure 26). La formule de calcul du bilan thermique (H) est la suivante :

$$(2) \quad H = \frac{1}{A_0} \int_{Z_m}^{Z_0} C_p * T_{ref} * dV$$

Avec p : densité de l'eau (1kg/cm^3), C_p : chaleur spécifique de l'eau (1cal/cm^2), A_o : superficie du plan d'eau, T_{ref} : température de référence à la profondeur z , dV : volume à la profondeur z

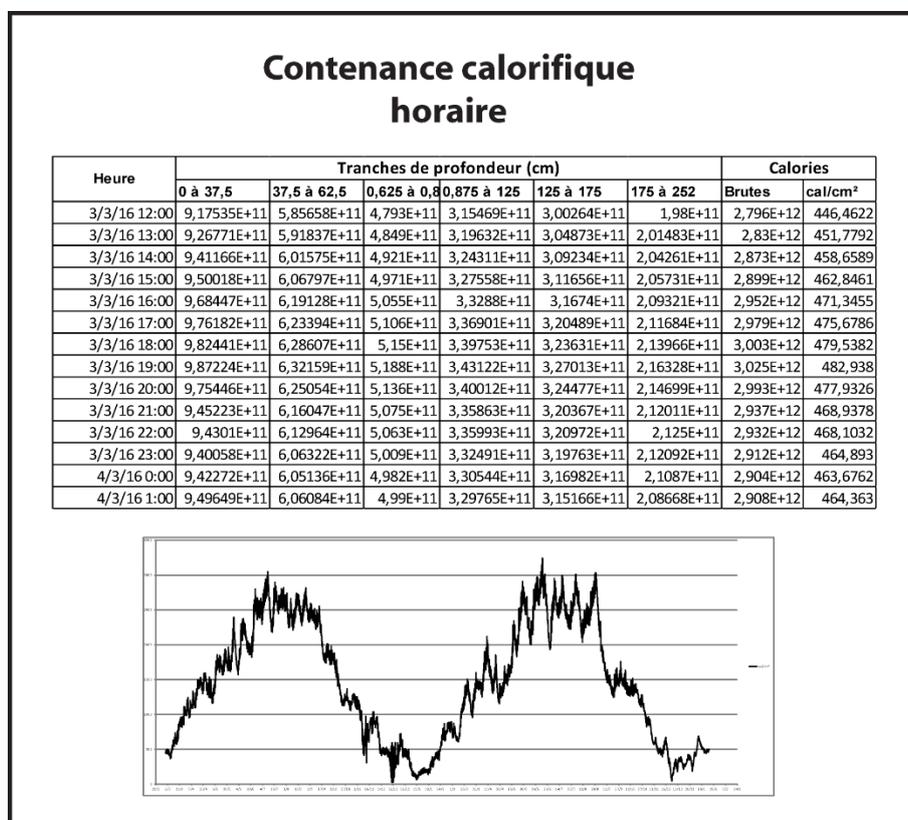


Figure 26: Calcul de la contenance calorifique horaire à partir des données thermiques et de la bathymétrie du plan d'eau. Q. Choffel, 2017

En développant cette méthodologie on obtient des connaissances sur la contenance calorifique horaire. A partir de cette échelle, il est possible d'établir des bilans thermiques journaliers, mensuels ou annuel. Ce dernier étant la définition première du bilan thermique, par soustraction du minimum annuel au maximum. Dans cette étude, la contenance calorifique horaire servira d'élément de base pour l'analyse de l'évolution du bilan thermique, ramené à une échelle annuelle et pluriannuelle à des fins de comparaison avec d'autres étangs.

En plus de faire varier les échelles temporelles, il est possible de faire varier la composante spatiale du bilan thermique en y intégrant les données sur plusieurs secteurs de l'étang.

3.2.2 Outils et méthodes d'analyse des variations spatiales du fonctionnement thermique des petits plans d'eau

Lorsque l'on étudie la variation spatiale d'une composante lacustre, le choix s'oriente généralement vers les modélisation et l'analyse par télédétection. Sur les grands plans d'eau, l'apport récent d'outils de télédétection permet une analyse à une petite échelle de la variation de température de surface. Cette approche est couramment préférée à celle de données *in situ* pour les grands lacs, de par la précision des données et leur résolution (Sima *et al.*, 2013, Soullignac *et al.*, 2013, Wang *et al.*, 2014). L'utilisation de modèles permet d'estimer la température des couches lacustres profondes. Pour les étangs et l'ensemble des petits plans d'eau polymictiques, leur faible superficie ne permet pas une résolution suffisante dans l'analyse par télédétection (Prats & Danis, 2018). De plus, la variation temporelle élevée ainsi que la faible connaissance du fonctionnement des couches de fond et des périodes de brassage et de stratification ne permet pas d'utiliser une modélisation correcte. Dans ce dernier cas, les étangs sont souvent considérés comme homogènes verticalement afin de faciliter leur modélisation. L'apport de données *in situ* mis en valeur par la réalisation d'interpolations cartographiques permet l'analyse complète du fonctionnement thermique, de l'alternance des phases de brassage et stratification, de la température de la couche de fond ainsi que de sa capacité à se stratifier. On peut cependant regretter que cette méthode ne permette pas de prédire le fonctionnement futur et devra être couplée avec un modèle une fois la connaissance du milieu complète.

3.2.3 Interpolation des données thermiques ponctuelles : les cartes de variation spatiale de la température des étangs

2.2.4.4 L'apport de la télédétection et de la modélisation dans l'analyse thermique des milieux aquatiques

Le renouveau de l'étude du bilan thermique des lacs a été effectué par le biais de la modélisation depuis les années 1970. La modélisation a pour but de globaliser l'ensemble du système lacustre en se plaçant « *entre le scientifique qui cherche à réduire le champ des zones obscures et le système [que la modélisation a] la capacité d'appréhender* » (Tassin, 1986, p. 40). Le but reste d'améliorer la connaissance du milieu et de déterminer des seuils quantitatifs pour assurer le bon fonctionnement du milieu. La modélisation permet

d'apporter des solutions dans l'analyse du fonctionnement lacustre à l'aide de données in situ et de la compréhension au préalable du système étudié (Vinçon-Leite, 1995). Pour les étangs, avant toute modélisation, ce besoin de connaissance au préalable du fonctionnement physique du milieu est nécessaire du fait du manque d'étude.

La modélisation est apparue comme un outil face aux besoins de connaissance des réactions du milieu à l'encontre de diverses pollutions anthropiques. L'eutrophisation est, selon Tassin (1986), la première grande cause de développement et d'accélération de la modélisation lacustre. Cette dernière permet une simplification du système lacustre et ainsi de procéder à une analyse analytique des éléments. L'intérêt pour le calcul de l'évaporation dans les années 1970 a également conduit au développement des outils de modélisation lacustre. Le bilan thermique a ainsi été modélisé afin de connaître l'évaporation, variable la plus difficile à modéliser (Bolsenga, 1975).

La température de l'eau peut être modélisée à l'aide de modèles statistiques (Bolsenga, 1975, Henderson-Sellers, 1986) ou déterministes (Hostetler, 1993, Peeters *et al.*, 2002, Weinberger et Vetter, 2012, Piccolroaz *et al.*, 2013, Toffolon *et al.*, 2014). Les premiers utilisent majoritairement la température de l'air pour prédire celle de l'eau (Maheu *et al.*, 2016). D'autres variables, telles que les débits entrants et la bathymétrie peuvent être utilisées (Hakanson, 1996). L'avantage majeur des modèles statistiques réside dans leur facilité d'utilisation et la faible quantité de données nécessaires à leur application (Maheu, 2015). A l'inverse, l'utilisation de données météorologiques en entrée ne permet pas de réelles comparaisons entre les lacs. L'interprétation récente d'images satellites comme données d'entrée, au lieu de la température de l'air, permet une plus grande précision ainsi qu'une étude de la variation spatiale au sein d'un plan d'eau.

Les modèles déterministes définissent la température de l'eau à partir de calculs mathématiques à l'interface entre l'air et l'eau. L'ensemble des processus d'échanges thermiques entre le plan d'eau et l'atmosphère sont représentés dans ces modèles par des équations mathématiques. Des calculs permettent de prédire la température de fond à partir des échanges à la surface et des conditions thermiques du lac, soit en période de stratification ou d'homothermie pour les lacs assez profonds afin d'avoir une stratification saisonnière, en milieu tempéré. La grande difficulté réside dans les plans d'eau peu profonds, tels que les étangs, où l'alternance de stratification et brassages fréquents complique la

modélisation des températures de fond adaptées à des modèles bi ou tri-couches. L'apport de chaleur fréquent tout en étant irrégulier dans les couches de fond lié aux nombreux brassages des plans d'eau polymictiques est modélisé de façon peu précise.

Les étangs sont des plans d'eau difficilement modélisables, dans un premier lieu, du fait du manque de connaissance de la dynamique thermique annuelle ainsi que du faible intérêt (bien que grandissant) porté à ces milieux. Le choix de la profondeur de l'épilimnion par défaut de certains modèles ne permet pas d'intégrer les étangs comme des plans d'eau modélisables en trois couches. Dans le modèle développé par Ottosson et Abrahamsson (1998), l'épilimnion s'étend sur les deux premiers mètres de profondeur, soit la totalité de la colonne d'eau d'une grande majorité des étangs, dépassant rarement les 2 m de profondeur maximale.

La télédétection et les petits plans d'eau polymictiques

La DCE impose le suivi en France des lacs et étangs de plus de 50ha, intégrés dans la masse d'eau dénommée *Masse d'eau plan d'eau*. Bien que la température de l'eau ne soit pas retenue comme un élément déclassant de l'état d'un plan d'eau, il est intéressant de connaître le comportement thermique de ces masses d'eau plan d'eau. L'évaluation de la thermo-dynamique repose sur la sensibilité des plans d'eau aux pressions du bassin versant, sur l'étude d'impact sur le continuum cours d'eau-plan d'eau-cours d'eau ainsi que sur l'efficacité des programmes de mesures potentiels. Le besoin de connaissance se fait ressentir à l'heure actuelle mais également en prévision d'un changement climatique futur (La Jeunesse & Quevaullier, 2016).

L'attention limnologique se porte sur les plans d'eau de plus de 50 ha, selon la limite imposée par l'application française de la DCE (LEMA, 2006). Cette limite surfacique de 50 ha ne permet pas la prise en compte des étangs et de la majorité du panel lentique national, soit moins de la moitié de la superficie en eau de la France (Bartout, 2015). Le choix de cette valeur de 50 ha semble incompréhensible, sa justification scientifique reste encore à découvrir et le sujet sera développé plus avant dans ce document. Cette limite haute implique que seuls les quelques très grands étangs sont intégrés dans les plans d'eau DCE, tel que l'étang de la Ramade étudié lors de cette thèse, mais leur nombre est très réduit. L'étude des petits plans d'eau, et donc de la grande majorité des pièces d'eau du territoire reste secondaire. Ces derniers sont considérés au même titre que des cours d'eau dans

l'évaluation des masses d'eau DCE (Bartout, 2018). Or, à l'inverse des cours d'eau, les plans d'eau sont caractérisés par leur capacité à se stratifier et donc par la domination des échanges verticaux, même pour les plus petits d'entre eux (Touchart, 2002, 2007, Folkard *et al.*, 2007).

Les étangs représentent une boîte noire dans l'analyse des échanges thermiques au sein du réseau hydrographique. Largement présents sur le territoire français avec plus de 200 000 entités (Bartout & Touchart, 2013), le besoin de connaissance et de modélisation de ces milieux se fait ressentir (Danis, 2000, Prats & Danis, 2018, communication orale 2017²⁴, Soullignac *et al.*, 2017). Leur nombre important joue un rôle majeur dans certaines régions dont les cours d'eau sont fortement influencés sur tout ou partie de leur linéaire.

Les données satellitaires sont une base importante de connaissance de la thermie des plans d'eau (Prats & Danis, 2015, 2018, Launeau *et al.*, 2019) bien que la résolution, fréquence ou encore heure de passage limite certaines recherches. A une autre échelle, à l'inverse, la fréquence temporelle permet une analyse sur un laps de temps long pluriannuel, dès les premières campagnes de relevés satellitaires. A une échelle temporelle plus fine, la fréquence de passage des satellites à des pas de temps mensuels, hebdomadaires et même journaliers peut questionner sur la pertinence des données thermiques utilisables pour les plans d'eau aux dynamiques rapides, soit les plans d'eau polymictiques. A titre d'exemple, le satellite américain Landsat7 a une fréquence de passage de 16 jours. Pour les études en lac suffisamment profond, où la thermocline est saisonnière et la variation de température de surface faible, cette fréquence de passage peut être suffisante. En revanche, pour les étangs et plus largement les plans d'eau à brassages fréquents, cette période est supérieure à celle séparant deux phases de stratification thermique qu'ils soient peu profonds (Touchart, 2007) ou profonds (Soullignac *et al.*, 2017). De ce fait, il est peu cohérent d'utiliser ces données thermiques dont la représentativité est très fortement limitée sur les étangs. Certains satellites ont une fréquence de passage plus grande, allant même jusqu'à des données journalières (QuickBird-1) à moins de 5 jours (Orbview 3 et 4). Dans le cas des données journalières, le passage de satellite à une seule reprise, dans la matinée sous nos latitudes, diminue l'intérêt de l'étude et notamment dans la composante spatiale, les enjeux majeurs

²⁴Réunion d'échange au Pôle Plan d'Eau de l'Onema-Irstea, sur la température des petits plans d'eau et leur modélisation future, le 21 janvier 2016, à Aix en Provence

de répartition de chaleur opérant au maximum calorifique généralement à la fin de la journée. Les plans d'eau polymictiques sont très réactifs face aux forçages externes du fait de leur faible profondeur. En quelques heures, les variations de température peuvent être très élevées (Touchart, 2002, 2007, Folkard *et al.*, 2007, Soullignac *et al.*, 2017) remettant en question la représentativité de l'utilisation de données journalières.

A l'inverse des données sur la température de l'air sur les petites étendues d'eau, les données satellites peuvent permettre de mettre en évidence une variation spatiale de la température de surface pour les plans d'eau de grande superficie (Wang *et al.*, 2014). Landsat 7 a une résolution spatiale de 60m permettant d'évaluer la répartition de chaleur au sein d'un plan d'eau de taille modeste. D'autres satellites haute-résolution peuvent aller jusqu'à 4m de résolution pour les satellites QuickBird-1 et Oberview 3 et 4. Cette résolution permet d'analyser l'ensemble des étangs, dont la superficie est généralement supérieure à 1 ha mais ne bénéficie pas de capteurs thermiques (Tableau 4).

Tableau 4: Résolutions spatiales des satellites bénéficiant de capteurs thermiques (Wawrzyniak, 2012)

Instruments	Satellites	Résolutions spatiales thermiques (m)
ETM+	Landsat 7	60
TM	Landsat 5	120
MODIS	Terra	1000
MODIS	Aqua	1000
ASTER	Terra	90
AVHRR/3	NOAA	1090

L'analyse spatiale de la température de surface via les images satellites est une première approche intéressante, permettant une compréhension globale du fonctionnement du plan d'eau. L'utilisation de modèles, et notamment de modèles 3D pour la prise en compte de la variation spatiale, est ensuite nécessaire à l'interprétation de ces données et à la connaissance des températures des couches inférieures (Soullignac *et al.*, 2017).

La résolution des images satellites pour l'étude des petits plans d'eau est problématique lorsque l'on travaille à petite échelle cartographique (Downing, 2010, Prats &

Danis, 2018). A grande échelle cartographique, soit à l'échelle du plan d'eau, ce problème existe pour les tous petits plans d'eau, entre 0,1 et 1 ha. La marge d'erreur, liée notamment à la pollution thermique des zones proches du bord est trop importante pour ces petits systèmes. La forme des étangs, parfois complexe, peut également être un problème pour l'utilisation des données Landsat, après nettoyage des données en bordure de l'étang (Danis, comm. or., 21 janvier 2016) où le risque réside dans le faible nombre de pixels utilisables (Figure 27).

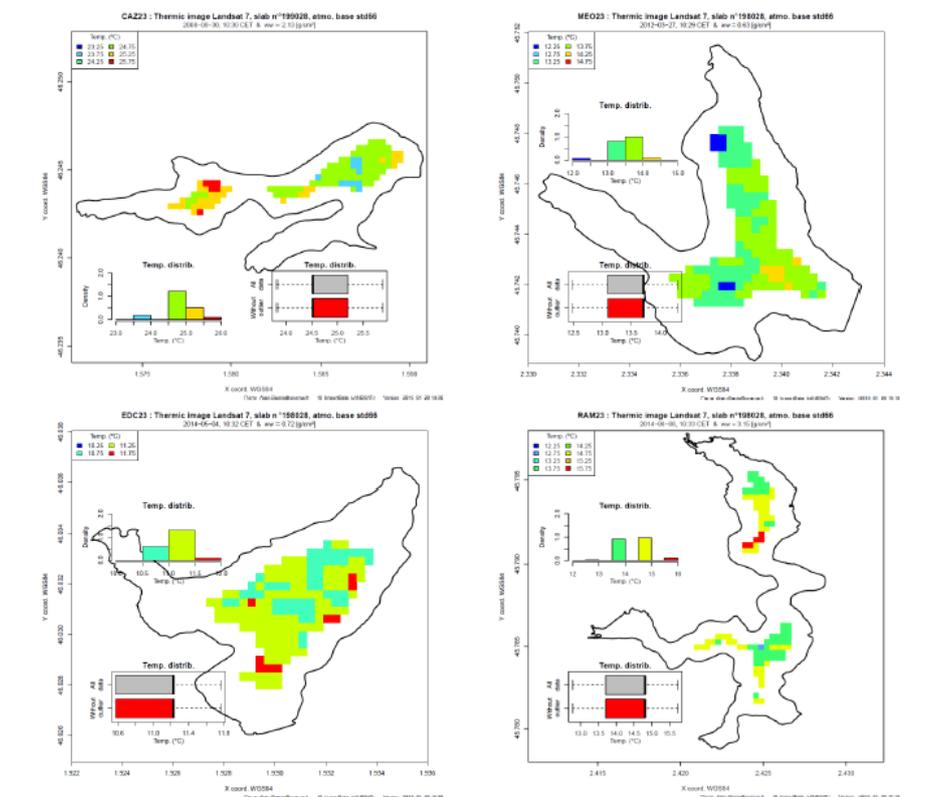


Figure 27: Traitement satellite de la température de l'eau de 4 étangs limousins. Source : Pierre-Alain Danis, pôle plan d'eau AFB-IRSTEA, Aix en Provence, 21 avril 2016

Les études thermiques sur les étangs sont difficilement ancrées dans la modélisation (Soulignac, 2017). A l'image des petits ruisseaux non exploitables par des données satellite classiques telles que Landsat (Wawrzyniak, 2012) la petite taille des étangs ne permet pas d'utiliser les outils de télédétection développés en milieu lacustre. Le développement de modèles spécifiques aux étangs semble être la voie logique de la continuité de ceux appliqués aux lacs.

La première étape reste la connaissance de l'évolution spatiale de la température de ces milieux, latéralement et verticalement, ainsi que les facteurs de réponse aux forçages

externes provoqués par les conditions météorologiques. Ces données sont essentielles afin de valider les modèles, notamment pour les températures hypostagniques et en hiver, où certains modèles ont des difficultés à prédire les températures hivernales ainsi que les périodes de gel (Soulignac, 2017). En effectuant une partie de sa thèse sur un lac de gravière à Créteil dont les caractéristiques sont proches de celles des plus grands et profonds étangs (40 ha, 6,5 m de profondeur maximale), F. Soulignac a mis en avant la difficulté et le manque de connaissance du fonctionnement de ces milieux (Soulignac, 2017). La modélisation en deux ou trois dimensions de ce système polymictique apporte de nouvelles connaissances dans l'hydrodynamique et la variation verticale et horizontale de température. Des écarts conséquents de dynamisme ont pu être observés entre les lieux de mesure en continu sur le lac de Créteil, séparés de moins de 200 m. L'apport d'un modèle en trois dimensions pour ces systèmes confirme le besoin de connaissance de la dynamique thermique du milieu, en trois dimensions, ainsi que des facteurs externes pouvant affecter ces échanges. La présente étude s'intègre comme la complémentarité de ce travail de modélisation permettant de créer des modèles appliqués à ces milieux en tentant d'expliquer les phénomènes créant des hétérogénéités thermiques verticales et horizontales en étang. Enfin, il est intéressant également de compléter l'étude par des milieux de très petite taille alors jamais modélisés et peu connus mais très nombreux sur le territoire métropolitain (Bartout, 2016).

Des études sur des plans d'eau très peu profonds, de 1 m de profondeur moyenne, ou de moins de 0,5 ha de superficie permettent de s'attarder sur les étangs dans la moyenne nationale (Bartout & Touchart, 2013) et non aux limites du seuil surfacique et de profondeur entre l'étang et le lac.

La modélisation est un outil performant et intéressant qui nécessite d'être développé pour les étangs, dont le fonctionnement polymictique est complexe. Une bonne connaissance et compréhension du fonctionnement physique du milieu est nécessaire à l'aide de données in situ avec une grande précision, l'apport de la télédétection se limitant aux plus grands d'entre eux, afin de développer un possible modèle. Au sens mathématique, ce modèle n'est pas l'objet de la thèse mais il est nécessaire d'être mis en avant ici, car il peut être un outil performant pour la gestion de ces milieux et leurs prédictions futures (Vinçon-Leite, 1995, Danis, 2003). Cette thèse se situe à la première étape, c'est-à-dire une connaissance complète du milieu et de ses variations de températures en fonction de la

profondeur, la superficie ou encore d'autres facteurs environnants afin de cerner au mieux la dynamique rapide de ces milieux.

2.2.4.5 Méthode de cartographie des discontinuités thermiques

La prise de mesure in situ, en plusieurs points de l'étang, et avec une grande précision verticale offre une approche spatiale plus fine que celle de la grande majorité des études en lac, et est innovante en étang. Pour améliorer la qualité visuelle du travail effectué, le choix s'est porté sur l'élaboration de cartes de variation spatiale de la température à partir de mesures dispersées. Les outils d'interpolation permettant de faire la jonction entre le ponctuel et le surfacique sont multiples. Le faible nombre de géographes limnologues n'a pas permis une démocratisation de ces outils et le critère d'interpolation parmi les multiples méthodes reste un choix difficile. La représentation 2D ou 3D de l'environnement lacustre et marin est portée sur la modélisation majoritairement (Hamilton, 1996, Sahlin, 2014, Abbasi *et al.*, 2016, Prats & Danis, 2015, 2018, Soulignac, 2017), liée à la faible représentativité spatiale des données, souvent limitée à un seul point de mesure.

Les outils d'interpolation spatiale sont regroupés en deux familles : les méthodes déterministes (1) et les méthodes géostatistiques (2). Les premières sont basées sur des fonctions mathématiques et prennent en compte les sites d'observation voisins. Leur mise en œuvre est particulièrement simple et directe (Murphy *et al.*, 2012). Les méthodes déterministes peuvent être découpées en deux groupes, les méthodes barycentriques et les méthodes par partitionnement de l'espace :

Méthodes barycentriques : prennent en compte uniquement les sites d'observation immédiatement voisins. Demande un nombre de points conséquents.

Plus proche voisin : découpage en octants, interpolation sur les huit points de référence les plus proches. Importance plus grande que sa distance au point est faible. Efficace lors de la disposition de nombreux points, répartis de manière homogène.

Méthode inverse distance : poids retenu inversement proportionnel à la distance. Cette méthode et celle des plus proches voisins accorde beaucoup d'importance à la distance, plus ou moins justifiés selon les cas.

Méthodes par partitionnement de l'espace :

Triangulation de Delaunay : diviser le champ en triangles disjoints, dont les sommets sont les sites échantillonnés, puis interpolation à l'intérieur de chaque triangle. Elle opère seulement dans l'enveloppe convexe des sites et ne recouvre donc pas entièrement le champ.

Polygones de Thiessen : partitionnement de l'espace géographique en polygones, attribution d'une valeur à chacun des polygones. Elle permet de déterminer un zonage où la valeur de la variable à prédire est à priori la même que celle du site d'observation.

Les méthodes géostatistiques sont plus complexes et ont la possibilité d'inclure des variables apportant des informations à la variable cible. Parmi ces méthodes on retrouve le krigeage et le cokrigeage. Ces interpolations sont exactes, c'est-à-dire que la valeur estimée au point de mesure fixe est égale à ce point de mesure (Lam, 1983). Elles combinent des analyses statistiques avec des méthodes mathématiques, apportant une certaine complexité.

Les SIG ne sont pas optimisés pour des travaux sur du volume, que ce soit en hydrologie ou en océanographie, puisque créés pour des données terrestres (Ledoux et Gold, 2006). La composante temporelle est également difficilement réalisable même si de nouvelles applications prennent forme. La cartographie privilégie la photographie d'un instant donné ou de moyennes aux échelles souhaitées. La modélisation 4D, avec l'apport de la temporalité, serait intéressante à développer afin de suivre l'évolution de la température dans le temps et dans l'espace (Arsenault *et al.*, 2004). La cartographie 2D offre de nombreuses possibilités d'analyses en des temps variés, selon des conditions météorologiques particulières ou en comparant des moyennes journalières, diurnes ou mensuelles. Elle demande une sélection en amont de l'objet à démontrer, limitant l'analyse en continu à des instants précis.

L'analyse volumétrique peut être effectuée en interpolant les données thermiques de chaque strate du plan d'eau. Cette méthodologie s'est avérée efficace pour l'étude du port Hamilton, sur le lac Ontario (Halfon, 1996). D'autres options ont été utilisées en limnologie ou océanographie comme l'analyse verticale des différents points de mesure (Zhang *et al.*, 2015) ou encore l'analyse par transect (Read *et al.*, 2011, Zhang *et al.*, 2015). La cartographie sera notre support d'analyse principal des données thermiques spatialisées des étangs

étudiés. L'analyse en 3D sera privilégiée pour l'analyse temporelle de l'évolution de la température en fonction de la profondeur de la colonne d'eau.

Le choix de la méthode d'interpolation : élément fondamental dans l'analyse spatiale

L'analyse de plusieurs interpolations, toutes disponibles via des logiciels SIG, montre des écarts conséquents pour l'analyse des paramètres physico-chimiques de la masse d'eau. Le nombre de points de mesure et leur précision spatiale varie constamment lors de mesures de terrain et entraîne donc des variations possibles de qualité de l'interpolation. Plus le nombre de point est important et suit une logique spatiale, plus l'interpolation sera efficace. Sur quatre interpolations testées, l'interpolation par méthode de l'inverse distance (IDW) s'est avérée la plus précise (Figure 28). La méthode d'IDW respecte les valeurs de maximum et minimum (5,4 et 4,3 pour le jeu de données testé), la répartition spatiale de la température et offre un aspect esthétique correct. La méthode du plus proche voisin est proche mais n'extrapole pas les données et se limite donc aux points de mesure. Cet inconvénient n'apporte pas une information esthétiquement valable puisqu'en plan d'eau, elle ne prend pas en compte les zones d'absence de données, comme ici sur le littoral. Les interpolations de données thermiques par Spline ou Krigeage modifient particulièrement la répartition de la température. Pour ces deux méthodes, les minima et maxima sont modifiés. Pour le krigeage, le maximum est réduit de 5,4 à 4,8°C, tandis que c'est le minimum qui est modifié sur Spline, passant de 4,3°C dans les données mesurées, à 3,1°C dans l'interpolation. Sur la carte, les données sont faussées. La méthode par krigeage accentue la zone réchauffée au sud, ne concernant pourtant qu'un très faible secteur. Pour la méthode Spline, l'ensemble est perturbé par la présence d'une zone froide sur les littoraux au centre de l'étang lié à l'extrapolation entre les données mesurées et le littoral. Cette zone froide n'est pas réellement mesurée sur le terrain et provoque donc une erreur de lecture forte (Figure 28).

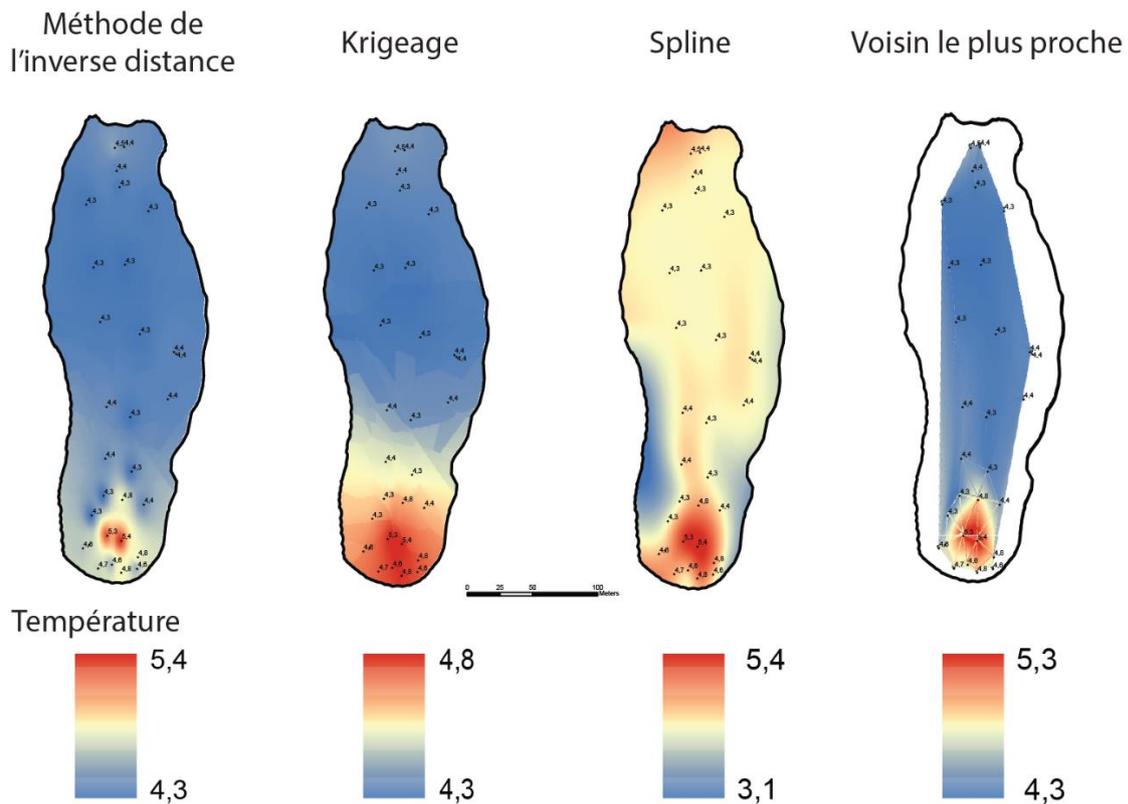


Figure 28: Etude comparative de 4 interpolations des mesures thermiques ponctuelles. Q. Choffel, 2018

L'interpolation IDW a été choisie pour les interpolations de mesures de terrain ponctuelles et continues. Elle semble être la méthode la plus appropriée pour l'interpolation de données physico-chimiques d'un plan d'eau. L'interpolation des données de surface peut être complétée par celles à plusieurs profondeurs. L'ajout de la structure thermique du plan d'eau permet un aperçu en 3D du fonctionnement thermique.

Le choix de la méthode d'interpolation est important et doit être discuté et testé en amont. Certaines interpolations lissent les résultats ou, au contraire, extrapolent en certains secteurs dont la donnée est manquante. Face à ces actions automatiques de quelques techniques d'interpolations, des résultats peuvent être faussés. Ces outils sont encore peu utilisés en hydrologie et mériteraient une plus grande attention et le développement de méthodes spécifiques à l'étude spatiale des milieux lacustres et stagnastres.

3.3 Quels indicateurs limniques de la structure de la colonne d'eau peuvent être utilisés en étang ?

Pour les plans d'eau polymictiques discontinus, la présence d'une thermocline pendant plusieurs jours modifie la structure physico-chimique et biologique de la colonne d'eau (Hutchinson, 1957, Dussart, 1966, Wetzel, 1983). La connaissance de l'alternance des phases de stratification, leur force et leur durée sont fondamentales dans l'étude physico-chimique. Cependant, l'ensemble des indicateurs ont été développés pour des plans d'eau profonds, estimant que ceux peu profonds sont verticalement homogènes. Les premières études thermiques en continu en étang indiquent une hétérogénéité verticale temporaire des plans d'eau peu profonds (Touchart, 2002, 2007, Folkard *et al.*, 2007). La dynamique particulière et la faiblesse de la stratification stagnante en comparaison à celle lacustre amène à se questionner sur les indicateurs pertinents et utilisables en étangs.

La convection mécanique, aussi appelée convection forcée, est le brassage de la masse d'eau effectué par une force externe. En cours d'eau, cette force est la pente du lit. En lac, c'est généralement le vent qui a cette capacité à transmettre de la chaleur dans les couches du fond et pouvant détruire la stratification thermique en place (Birge, 1916). L'effet du vent sur la masse d'eau diffère selon la structure thermique. En structure homotherme (« barotrope », Salençon & Thébault, 1994) l'action du vent agit jusqu'à une certaine profondeur, dépendante de sa force. La température étant homotherme, elle ne contraint pas le processus d'action vertical du vent sur la colonne d'eau. La chaleur est diffusée de manière turbulente au sein du plan d'eau (« *Eddy diffusion* ») dans le plan vertical et horizontal. L'action du vent sur une masse d'eau stratifiée est légèrement différente, que ce soit en structure bicouche (un épilimnion posé sur un hypolimnion) ou de manière plus complexe, en structure tri-couche classique. Un faible vent agit sur la partie superficielle du plan d'eau et provoque une inclinaison de la thermocline avec un épaissement de l'épilimnion au vent et un amincissement sous le vent (Touchart, 2002). Si le vent se renforce, la partie inclinée au vent commence à affleurer au niveau de la côte sous le vent, entraînant la masse d'eau dense de fond en surface, jusqu'à la destruction de la stratification et donc le brassage de la masse d'eau.

Celui des deux (stratification ou action du vent amenant au brassage) qui dominera l'autre dépend des forces relatives et peut-être exprimé par des indicateurs de stratification

des plans d'eau (Birge, 1915). Pour les épilimnions des lacs et pour les étangs, la formule employée peut-être celle du nombre de Wedderburn (Thompson & Imberger, 1980). La localisation de la thermocline, formant une barrière empêchant le transfert vertical dans la masse d'eau, peut être estimée à l'aide de la fréquence N de Brunt-Väisälä. Ce nombre atteint son maximum dans la partie de la thermocline où le gradient est le plus fort. La longueur de Monin-Obukov, L_{mo} , quant à elle est une mesure de la profondeur de la couche susceptible d'être homogénéisée par le vent en fonction de l'effet stabilisant du flux (positif) de chaleur gagnée par le lac (Lemmin, 1995).

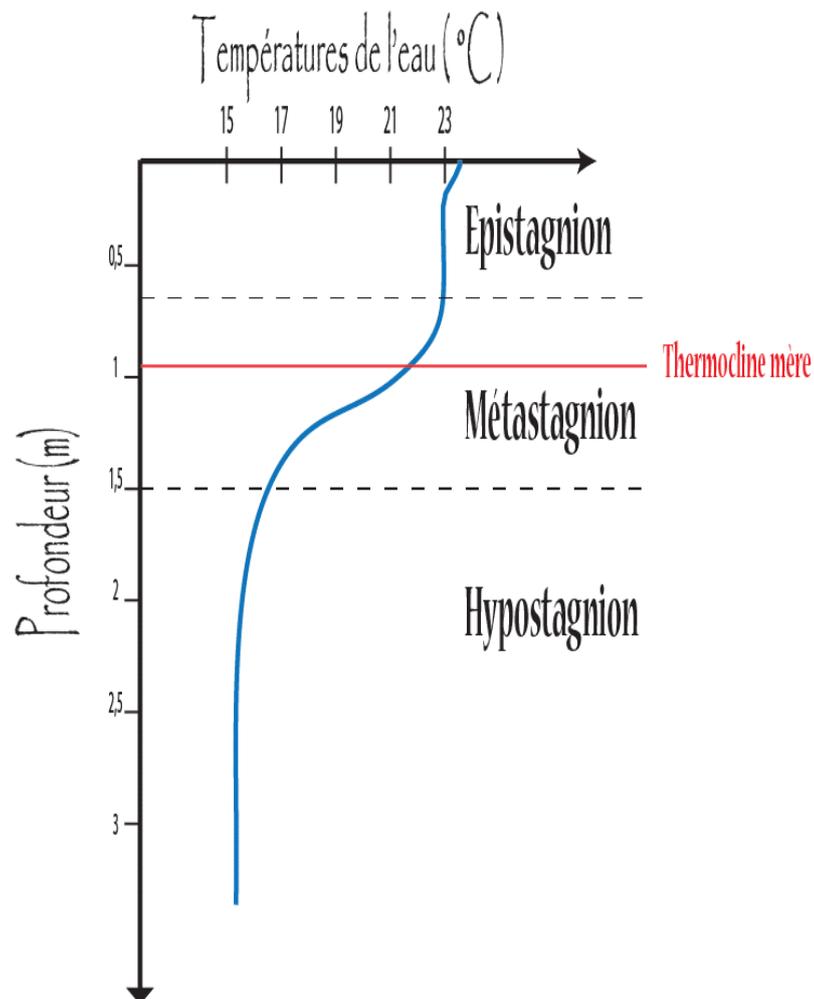
3.3.1 La thermocline et ses variations spatiales

La stratification thermique est l'élément majeur qui contribue à la structure du lac (Horne & Goldman, 1983). C'est l'événement physique le plus important dans le cycle annuel des lacs, étangs et réservoirs. Dans les lacs en été et sous nos latitudes, une stratification thermique s'installe pendant plusieurs mois. Une structure simplifiée en 3 couches est alors installée, avec une partie supérieure réchauffée et peu dense –l'*épilimnion*–, un étage froid et dense au fond –l'*hypolimnion*–, ainsi qu'un étage de transition entre les deux parties précédentes –le *métalimnion*. A l'intérieur du métalimnion, le plan d'inclinaison maximale de la courbe de température en fonction de la profondeur est appelé thermocline. Cette dernière n'est pas fixée à une profondeur et évolue dans le temps à des échelles journalières à saisonnières. Ce schéma fonctionne pour une grande majorité de lacs, dont la profondeur est suffisante pour bénéficier d'une stratification thermique saisonnière. Elle diffère cependant pour les lacs peu profonds et les étangs.

L'évolution de la thermocline en étang

Pour les étangs et une grande partie des plans d'eau polymictiques, leur faible profondeur ne permet pas une stratification saisonnière mais ils bénéficient d'un étagement de leur masse d'eau sur quelques jours. La structure thermique étant différente, et afin de ne pas simplifier le fonctionnement de l'étang et le réduire à la partie supérieure des lacs (Imberger & Thompson, 1980), L. Touchart a proposé une nouvelle toponymie de système tri-couche des étangs (Touchart, 2007) inspiré de celui lacustre. Il a été proposé que l'on nomme la partie supérieure de l'étang *épistagnion*, sa partie basse *hypostagnion* et l'étage intermédiaire le *métastagnion* (Figure 29). Le métabolisme des étangs est propre à ces masses d'eau avec l'établissement de stratifications thermiques allant de plusieurs jours,

pour les moins profonds, à plusieurs semaines pour ceux dont la profondeur est importante. Leur faible profondeur est compensée par la prise au vent réduite permettant à la stratification thermique directe ou inverse d'avoir lieu



Q. Choffel, d'après Horne & Goldman, 1983 et Touchart, 2007, modifié et adapté. 2017

Figure 29: Schéma de la décroissance de la température en fonction de la profondeur dans un étang. Q. Choffel, 2018

L'étude lacustre de l'évolution spatiale de la thermocline a été utilisée comme indicateur du changement climatique (Ambrosetti et Barbanti, 2001) ou encore comme élément de réponse de la structure du lac face à des changements de bilan thermique ou de brassages (Savy, 2006). Son évolution rapide dans le temps et dans l'espace sur des plans d'eau polymictiques, liée à l'alternance de phases de brassage et de stratification, permet des analyses temporelles et spatiales plus fines, notamment à l'aide de thermomètres enregistreurs (Touchart et Bartout, 2012). Ces auteurs ont mis en évidence la présence d'une thermocline principale, plutôt stable, et de thermoclines secondaires à évolution rapide au

sein des différentes couches de l'étang. Dans l'optique de réduire le risque thermique à l'aval de l'étang, la connaissance de la profondeur de la thermocline améliore l'efficacité du choix de sortie d'eau, et notamment l'efficacité du moine. La thermocline, sa force et sa durée, est fortement liée à la profondeur maximale du plan d'eau. L'estimation de sa profondeur sera calculée en plusieurs points de l'étang. Il sera alors possible de voir l'oscillation spatiale de la thermocline en un plan vertical et horizontal.

3.3.2 Les indicateurs de la stabilité de la colonne d'eau

Les étangs ne bénéficient d'aucun indicateur de leur stabilité qui leur est propre et, lorsqu'une étude est menée, des indicateurs lacustres sont utilisés. Mais ces indicateurs lacustres sont-ils utilisables pour les étangs où les phases de stratification sont courtes et la stabilité réduite à minima ? Un bref aperçu de la méthode de calcul des indicateurs de stabilité de la colonne d'eau et leur intérêt et origine lacustre sera discutée ici dans l'optique de les comparer et choisir parmi eux lesquels sont exploitables et précis en étang.

Trois indicateurs de stabilité de la colonne d'eau, parmi les plus utilisés en limnologie, ont été étudiés, soit le nombre de Wedderburn, la stabilité de Schmidt et la fréquence de Brunt-Väisälä, et appliqués aux étangs. Pour étudier leur dynamique thermique, la présence de données en continu, à des pas de temps court, est nécessaire.

3.3.2.1 Fréquence de Brunt-Vaisala

Une multitude d'indicateurs de la stabilité de la colonne d'eau existent, tels que le Nombre de Lac (« Lake Number », Imberger et Patterson, 1990) ou encore le paramètre de Stratification (Condie et Webster, 2001) en complément de ceux présentés. Ce dernier prend en compte des paramètres météorologiques tels que le vent ou le rayonnement solaire, sans nécessiter de données thermiques en entrée. Il n'est cependant pas compatible avec les données nocturnes où les flux radiatifs, alors principaux apports de chaleur, sont négatifs (Kimura *et al.*, 2016). Il est donc plus efficace sur des calculs aux échelles journalières (Condie & Webster, 2001), mais ne convient pas à l'utilisation de données horaires. Son utilisation est remise en question pour les étangs où la période nocturne peut donner lieu à un brassage ponctuel et dont le calcul à une échelle journalière ne permet pas une précision suffisante.

Le principe d'étude des oscillations et des gradients de densité dans l'atmosphère, développé par les chercheurs D. Brunt et la « *Brunt-frequency* » (1927) et V. Väisälä, avec la

« *Väisälä Frequency* » (1925), appelée fréquence de Brunt-Väisälä ou flottabilité, ou encore « *buoyancy frequency* » (Turner, 1973) pour les anglo-saxons, peut être appliqué en océanographie (Gill, 1982, Apel, 1987) et en limnologie (Goldman & Horne, 1983, Geller, 1992, Read *et al.*, 2011). Cet indicateur calcule la stabilité de la colonne d'eau basée sur le gradient de densité, soit le gradient thermique en lac d'eau douce. Sa méthode est simple et ne prend pas en compte le volume, à l'inverse de la stabilité de Schmidt, ni la vitesse du vent comme le propose le nombre de Wedderburn.

(3)
$$N^2 = \frac{g}{\rho} * \frac{\partial \rho}{\partial z}$$
 Avec g : accélération de la gravité terrestre, ρ : densité de l'eau, et z : profondeur

La fréquence de Brunt-Väisälä (N) est initialement calculée pour mesurer la profondeur de plus forte résistance, soit l'écart de densité maximal. Autrement dit, N est l'indicateur permettant de mesurer avec précision la profondeur de la thermocline mère et de possibles thermoclines saisonnières ou secondaires (Figure 30). Les premières applications en milieu aquatique de N^2 ont été développées en océanographie, sous l'élan de Turner (1973) suivi par Gill (1982) puis Appel quelques années plus tard (1987), qui la nomma également « *convective instability* » (p.167). Son utilisation en limnologie reste encore limitée, quand seuls quelques ouvrages citent et utilisent cette fréquence. Goldman et Horne, dans leur ouvrage de 1983, reprennent la figure de Gill pour énoncer le principe de N^2 (Horne et Goldman, 1983). Geller (1992) appliqua N^2 avec une approche spatiale en comparant plusieurs lacs chiliens. La fréquence ne sera reprise que plus tard et utilisée différemment par Ambrosetti et Barbanti sur l'étude des lacs italiens (Ambrosetti & Barbanti, 2002). Ils utilisent N^2 en la comparant avec la « *vertical turbulent diffusion (kz)* » afin de trouver la profondeur maximale subissant les mouvements de transfert d'énergie vers les couches profondes. En d'autres termes, la profondeur pour laquelle l'action du vent est confinée dans les couches supérieures.

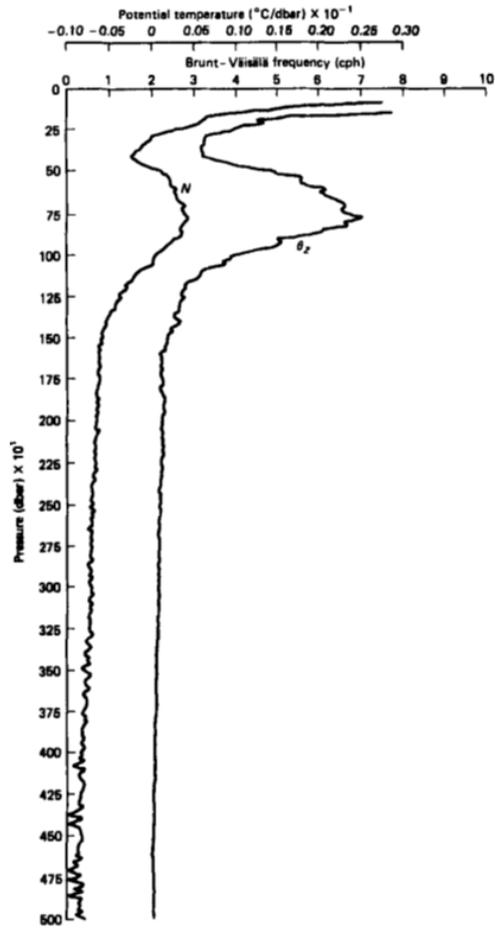


Figure 30: profil de variation de densité ainsi que de N selon la profondeur dans l'océan Atlantique (Gill, 1982)

Les calculs en étang permettent d'obtenir des informations sur la position de la thermocline, avec une précision dépendant du nombre de points de mesures verticaux (Figure 31). Il est un indicateur rapide de connaissance de l'oscillation de la thermocline dans le temps. Cette dernière étant située là où la fréquence N^2 atteint un maximum.

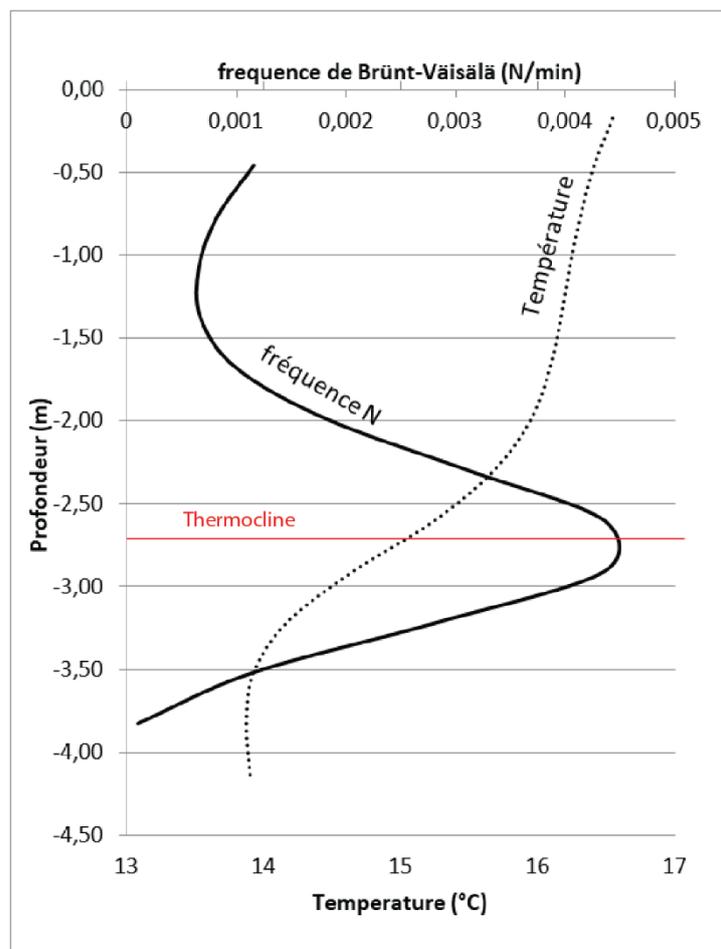


Figure 31: Evolution de la fréquence de Brünt-Väisälä (ligne noire) et de la température (pointillé) en fonction de la profondeur sur l'étang de Rilhac. Q. Choffel, 2018

Cependant, la position verticale de la thermocline évolue rapidement en plan d'eau polymictique au cours de la journée, à l'image de l'étang de Cieux et ses deux mètres de profondeur maximale (Touchart *et al.*, 2014) (Figure 32).

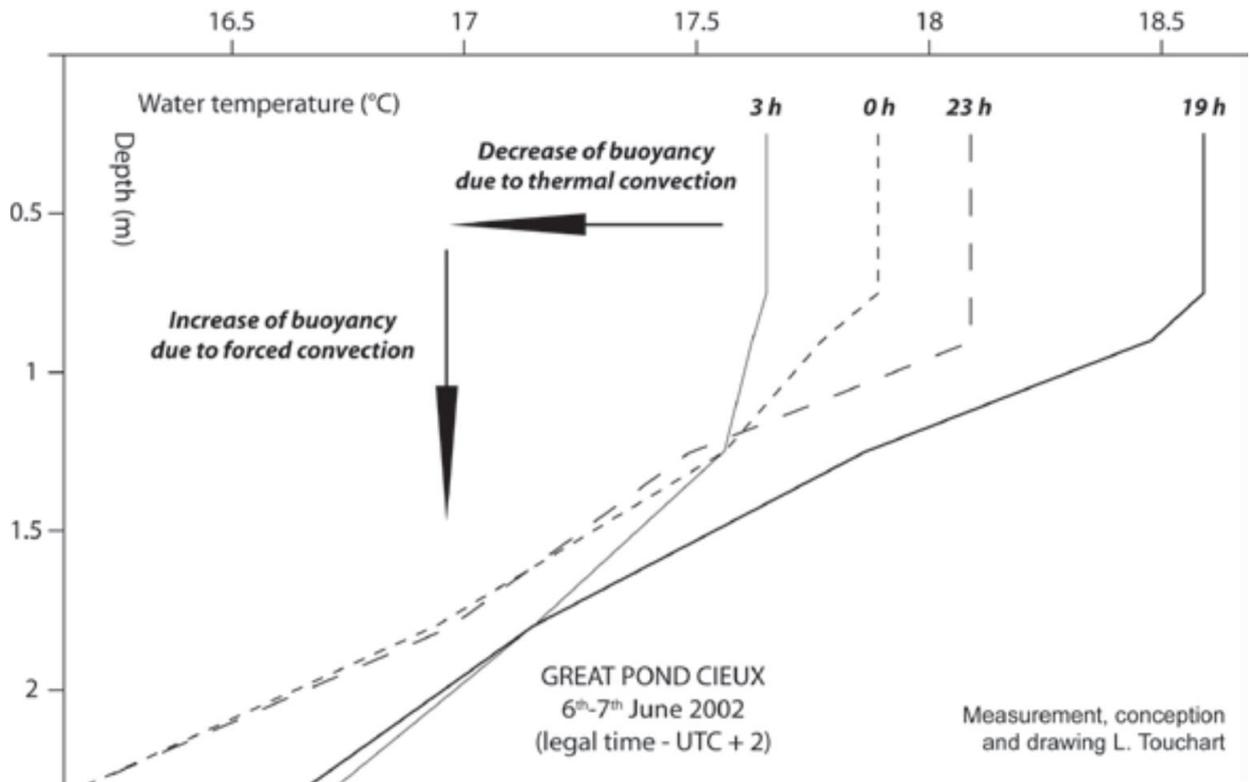


Figure 32: Evolution de la structure thermique de l'étang de Cieux sur la journée du 6-7 juin 2002 (Touchart et al., 2014)

A l'inverse des lacs, celle-ci n'est pas stable, hormis pour quelques jours au maximum de stratification estivale. La connaissance de sa position en un moment donné ne permet pas réellement l'extrapolation de sa dynamique complète, si ce n'est qu'à l'instant t , ou représentatif d'une tranche horaire spécifique. La variable temporelle est plus intéressante à cerner pour ces plans d'eau à dynamique thermique rapide.

La fréquence N a été étudiée ici en plaçant la temporalité en axe des abscisses et la valeur de N en ordonnée. On obtient un indice de la stabilité de la colonne d'eau en fonction du temps, à l'image de l'indicateur développé par Schmidt (1928). A l'inverse de ce dernier, la fréquence N^2 ne nécessite que des données de température et ne sollicite pas la connaissance au préalable du volume. Cet élément est important, car la connaissance de la superficie des petits plans d'eau est devenue facile à l'aide de l'analyse spatiale, mais la connaissance de leur volume reste délicate (Touchart & Bartout, 2013) et dépendante de l'existence d'une campagne bathymétrique antérieure.

Le calcul de la fréquence N requiert des données thermiques à plusieurs profondeurs afin de calculer dans un premier temps la densité de l'eau en fonction de la température, puis sa dérivée. Le calcul de la fréquence N sur plusieurs dérivées verticales permet de

connaître la zone de plus forte dérivée de densité, soit la thermocline. Lorsque la moyenne de la colonne d'eau est supérieure à 0 une stratification directe ou inverse est en place. A 0, c'est le brassage qui domine sur la colonne d'eau.

3.3.2.2 Nombre de Wedderburn

Alors que les indices de stratification de la masse d'eau se concentrent dans la littérature scientifique sur le saut thermique majeur, appelé thermocline mère, des chercheurs australiens ont relevé qu'il pouvait y avoir une première stratification dans l'épilimnion d'un lac, soit au-dessus de la thermocline mère (Thompson & Imberger, 1980). Le nombre de Wedderburn a été développé afin de mesurer la stabilité de la partie épilimnique du lac lors des phases de stratification thermique. A l'inverse des autres indicateurs, le nombre de Wedderburn étudie la partie supérieure uniquement, profonde de quelques mètres, à l'intérieur de laquelle peuvent se développer des sauts thermiques à des échelles journalières. L'épilimnion des lacs est la zone où se concentre la grande majorité du rayonnement solaire, absorbé dès les premiers mètres. La partie superficielle reçoit une quantité importante de rayonnement solaire, transformée en grande partie en chaleur au sein de la colonne d'eau. Le réchauffement rapide et diurne de cette couche superficielle entraîne des sauts thermiques journaliers, identifiables à l'aide du nombre de Wedderburn.

D'un point de vue thermique, les étangs sont souvent, dans la bibliographie scientifique, réduits à l'épilimnion du lac. Suite à des travaux menés en étang, des chercheurs ont utilisé l'indicateur développé par les chercheurs australien pour l'épilimnion lacustre à l'ensemble de la masse d'eau stagnante (Touchart *et al.*, 2014). Le résultat démontre une stabilité des étangs profonds d'au moins 1,8 m supérieure dans la durée à l'épilimnion lacustre. La réduction de la dynamique d'un étang à celui de l'épilimnion d'un lac est réfutée et il est ainsi recommandé de parler d'épistagnion pour la couche supérieure de l'étang, au-dessus de la thermocline mère et connaissant une dynamique journalière (Touchart, 2007, Touchart *et al.*, 2014). La formule du nombre de Wedderburn est la suivante (Thompson & Imberger, 1980) :

$$(4) \quad W = \frac{g' z^2 e}{u^2 L_s} \quad \text{Avec } g' = g \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho h}, \text{ accélération de la gravité liée au changement}$$

de densité entre l'hypolimnion et l'épilimnion, z_e est la profondeur de la base de la *mixed layer*, L_s est la course du vent et u est la vitesse de friction de l'eau due au vent.

Lorsque W est supérieur à 1, il est alors estimé que la colonne d'eau connaît une certaine stabilité par l'élaboration d'une stratification thermique. Plus les valeurs de W augmentent, plus la stratification thermique est forte. En dessous de 1, l'action du vent est supérieure à la capacité du plan d'eau à se stratifier, entraînant un brassage de la masse d'eau. Pour les données du fetch, nous avons appliqué la distance du littoral vers la bouée, en fonction de la direction des vents, entraînant des écarts allant de plus de 800 m sur l'étang de la Ramade si l'on ne prend pas en compte les orientations du vent.

A l'échelle pluri-journalière, le nombre de Wedderburn est directement lié à la vitesse moyenne du vent. Les journées à conditions atmosphériques calmes génèrent un nombre W élevé, dépassant la valeur de 10, jugée comme une très forte stabilité. Un vent faible va entraîner une légère augmentation, déjà perçue lors de précédentes études en lac (Horne et Goldman, 1983) et en étang (Touchart *et al.*, 2014). En revanche, en présence d'un vent soutenu, l'indicateur montre que le plan d'eau est rapidement brassé. Lorsque la stabilité du plan d'eau est héritée des stratifications fortes des jours précédents et de l'inertie thermique, le nombre W ne représente pas la stabilité réelle, estimant le plan d'eau brassé par la présence d'un vent soutenu. Dans ces cas, W sera proche de 0, tandis que la stratification thermique peut y être importante. Sur la période estivale de l'année 2016, le nombre de Wedderburn a été supérieur à 0 pendant 88 % du temps, de juillet à début septembre, soit lors du maximum de stabilité du plan d'eau. En revanche, seul 5 % du temps a dépassé la valeur de 5, contre 28 % supérieur à 1.

Sur un laps de temps long, nécessitant le calcul de moyenne de courses du vent et données thermiques, le nombre de Wedderburn est peu explicite pour les plans d'eau polymictiques. L'indicateur sous-estime la stabilité de l'étang lors des périodes peu ventées, contre une probable surestimation par temps calme. Il est difficile à exploiter géographiquement, initialement prévu pour de la modélisation mathématique, mais permet de montrer la force de stratification de l'étang, plus importante que les petits sauts thermiques au sein d'un épilimnion lacustre (Touchart *et al.*, 2014).

Le nombre de Wedderburn modifié

Le nombre de Wedderburn peut être modifié de sa fonction initiale, soit celle habilitée à mesurer les phases de stratification et de brassage. Quelques auteurs se sont penchés sur cet indicateur afin d'étudier les zones d'upwelling lacustres, caractérisées par

une remontée d'une eau de fond par l'action du vent (Thomson & Imberger, 1980). Ce phénomène est présent lors de phases de vent important, favorisant une remontée des eaux de fond à la côte sous le vent et un enfoncement des eaux de surface au niveau de la côte au vent. L'intégration de la composante spatiale prend tout son sens pour cet indicateur, où le facteur majeur est le vent et la longueur de sa course sur le plan d'eau. L'utilisation de l'échelle spatiale de W peut donner des résultats intéressants quant à la connaissance de l'hydrodynamique et de la thermie du plan d'eau. Elle se justifie pleinement en étang où la profondeur de la sortie d'eau peut être choisie afin de gérer le plan d'eau et le cours d'eau aval. En calculant les nombres de W dispersés en plusieurs points au sein du plan d'eau, il est possible d'analyser et de quantifier géographiquement l'effet du vent sur la colonne d'eau des étangs. L'indicateur a également été modifié et adapté en plaçant la course du vent nécessaire à la destruction de la stratification comme inconnue (Touchart *et al.*, 2014). Dans ce cas, on obtient une modélisation de la course du vent nécessaire, en tout point du lac, afin de brasser totalement ou partiellement le plan d'eau. En fonction de l'orientation, cette valeur varie considérablement aux différents points cardinaux. Cette adaptation du nombre de wedderburn permet de palier à un problème d'absence possible de données météorologiques. Sans la présence de mesures du vent, le calcul original n'est pas possible. Les mesures approximatives, liées aux zones d'abris ou à l'éloignement de la station météorologique peuvent entraîner générer ? des marges d'erreur conséquentes. En la présence de données thermiques aquatiques in situ, le nombre de Wedderburn peut permettre de connaître justement la vitesse du vent nécessaire à brasser notre masse d'eau stratifiée. Cette valeur peut varier fortement en tout point du lac, d'autant plus si la Morphologie complexe ou la topographie locale ne permet pas une diffusion homogène de la force éolienne.

3.3.2.3 Stabilité de Schmidt

La stabilité de Schmidt a été développée afin de mesurer la résistance de la stratification de la colonne d'eau face au forçage mécanique nécessaire au brassage de la colonne d'eau entière, en gardant la même quantité de chaleur (Schmidt, 1915, 1928). Schmidt a mesuré la force exercée par la colonne d'eau afin de lutter face à ce forçage externe, définie par la formule suivante (Schmidt, 1928) :

$$(5) \quad S = Z_s \int_0^{Z_m} \sigma Z f_z D z - \int_0^{Z_m} \sigma Z f_z D z$$

Avec S : Stabilité, Z_s : centre de gravité, z : profondeur, z_m : profondeur maximale, F_z : superficie du plan d'eau à la profondeur z , D_z : densité à la profondeur z .

La formule a été modifiée par Hutchinson (1957) dans un premier lieu, puis par Idso (1973) afin de réduire les effets du volume du lac sur les calculs :

$$(6) \quad St = \frac{g}{A_s} \int_0^{ZD} (Z - Zv) \rho z A z \delta z$$

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

La stabilité St dépend de la variation de densité entre les couches superficielles et celles profondes (P2-P1). Or, celle-ci est d'autant plus grande que les différences de température sont plus importantes et que les températures sont éloignées de 4°C.

Cet indicateur est très largement utilisé sur les lacs et n'a pas encore fait l'objet d'une analyse sur étang. Il exprime pourtant l'évolution de la stabilité du plan d'eau au cours du temps. Celle-ci pouvant atteindre des valeurs importantes, même en étang, liées à la différence de température entre la surface et le fond. La stabilité peut être comparée entre les différents plans d'eau, que ce soit les lacs ou les étangs. Des comparaisons peuvent être développées au sein d'un plan d'eau, suite à un découpage préalable en bassins, avec des mesures thermiques indépendantes.

3.3.2.4 Quels indicateurs sont pertinents pour les plans d'eau polymictiques?

La particularité bathymétrique des étangs rend complexe leur analyse de stratification thermique. La faiblesse de la durée et de la force de la stratification laisse penser que l'on peut être confronté à certaines difficultés si l'on applique des indicateurs développés pour les grands lacs profonds avec une structure tridimensionnelle à évolution saisonnière. L'objectif est de trouver un indicateur permettant d'illustrer les phases de stratification stagnantes avec la plus grande précision possible. Le moyen le plus efficace de connaître les phases de stratification thermique lorsque l'on possède des données in situ est la méthode de l'écart thermique surface-fond. Lorsque celui-ci est supérieur à 1°C il est estimé que l'on peut considérer qu'une stratification thermique prend place ou que celle-ci résiste à sa

destruction (Wetzel, 1983). Cependant, cette méthode nécessite d'avoir des relevés en surface et en fond. Elle est peu efficace pour la comparaison entre plusieurs lacs ou plusieurs points d'un même lac dont la bathymétrie peut être différente.

Nous avons comparé la courbe de l'évolution de l'écart entre la surface et le fond d'un étang avec les trois indicateurs de stratification thermique présentés sur la période du 7 juillet au 12 septembre 2016 (Figure 33).

La stabilité de Schmidt (S) et le nombre de Brunt-Väisälä (N) se rapprochent de la courbe des écarts thermiques surface-fond. Les périodes de brassage et de stratification de l'étang sont bien représentées. La seule exception réside dans la période du 24 juillet où les deux indicateurs représentent une phase de brassage partiel proche de l'homothermie complète de la colonne d'eau, tandis que l'écart entre la surface et le fond est supérieur à 3°C au minimum. Les valeurs de S et de N se sont rapprochées de 0 sans toutefois l'atteindre ce qui montre donc une stratification très affaiblie sans toutefois qu'il y ait un brassage complet. Lors du maximum d'écart entre la surface et le fond le 19 juillet 2016, N a également atteint son maximum. S a atteint des maxima lors de périodes de plus faible stratification si l'on observe les données *in situ*. La journée du 19 juillet 2016 correspond au maximum de température de surface avec 31,56 °C. Lorsque la surface de l'étang est surchauffée, le gradient de densité est plus fort en raison des températures élevées et de la différence avec les couches les plus profondes. Les écarts de densité sont d'autant plus forts que la température est élevée, le maximum se trouvant entre 30 et 35°C. La fréquence N sera alors la plus forte. À l'inverse, c'est bien la quantité de chaleur et sa capacité à résister au forçage mécanique que mesure la stabilité S. Dans ce cas, dans la journée du 9 juillet 2016 par exemple, avec une thermocline plus basse et donc un épistagnion plus profond, la stabilité est au maximum. La résistance au vent est à ce moment-là plus forte que lors de la présence d'une thermocline haute, liée à un réchauffement important et rapide des premiers centimètres. La fréquence N ne prend en compte que les écarts de densité et est donc efficace lorsque l'on possède un échantillon de données thermiques suffisant. La stabilité utilise également le volume et est plus propice aux plans d'eau profonds où la bathymétrie joue un rôle majeur dans la résistance à l'action mécanique du vent (Figure 33). S prend en compte l'aspect en trois dimensions avec l'importance de la thermocline et de sa position. Plus la thermocline est haute, moins la résistance sera forte.

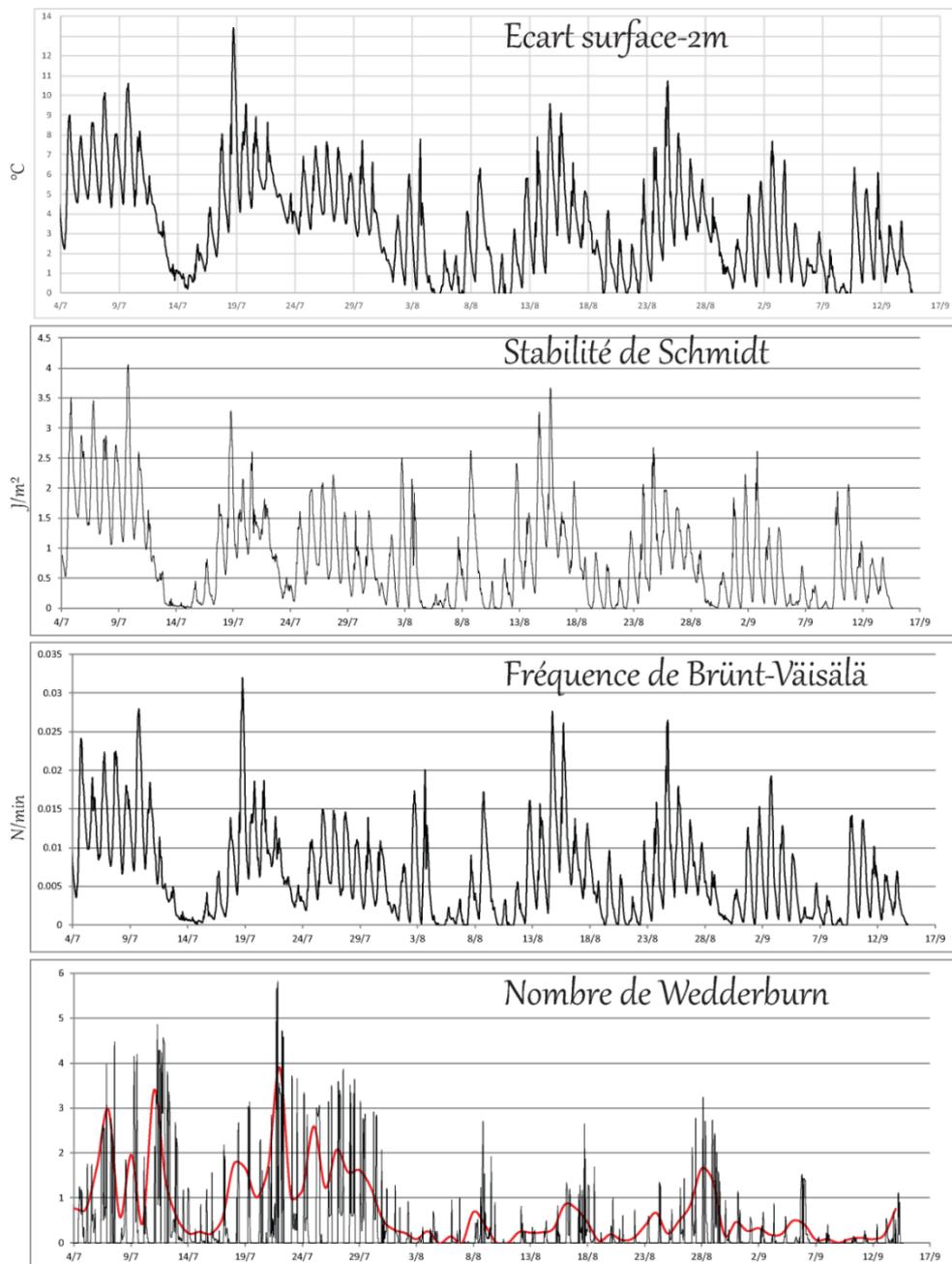


Figure 33: Evolution temporelle des différents indicateurs de stabilité de la colonne d'eau d'un étang. Q. Choffel, 2018

Le nombre de Wedderburn (W) est à part des autres indicateurs observés puisqu'il intègre les conditions météorologiques. Le pas de temps horaire n'est pas le plus intéressant car il offre des résultats ponctuels, trop fortement soumis à la vitesse du vent, pouvant être nulle est donc perturber le calcul. A l'échelle journalière (Figure 33, en rouge), W suit globalement les phases de stratification et de brassage de l'étang. Sa faible précision ne lui permet pas de mesurer les possibles brassages nocturnes liés au refroidissement

atmosphérique. Les stratifications les plus fortes sont bien représentées. Celles plus faibles sur quelques jours de début ou de fin d'été le sont beaucoup moins. Il n'est pas l'indicateur de stratification de la colonne d'eau le plus intéressant en étang, malgré son utilisation première pour la partie supérieure du lac. En revanche il donne des indications de l'effet du vent sur la colonne d'eau des étangs. Alors que W montre un brassage supposé du fait de vents importants, l'étang parvient parfois à résister au forçage mécanique. La période du 13 au 18 août 2016 en est un bon exemple, où l'étang est stratifié avec des écarts surface-fond importants tandis que W indique un brassage de l'étang lié à un vent fort. Dans le cas de W, une étude sur un laps de temps court, prenant en compte la direction et la force du vent peut être efficace lorsque celle-ci est couplée avec l'utilisation d'un autre indicateur comme la stabilité de Schmidt ou la fréquence N^2 .

Sur une période longue et à l'échelle horaire, il est préférable d'utiliser la stabilité S ou la fréquence N pour mesurer les alternances de brassage et de stratification de la colonne d'eau des étangs. L'inconvénient de la stabilité réside dans la nécessité de connaître et délimiter un volume de masse d'eau. Pour la fréquence de Brünt-Väisälä, l'inconvénient est dans le calcul des dérivés nécessitant une quantité importante de données verticales pour une précision convenable. En dessous de quatre données verticales, le calcul n'est pas possible et le résultat serait biaisé.

Les étangs peuvent donc bénéficier des indicateurs utilisés et développés en lac. Leur faible stratification, comparé à celle des lacs profonds, n'est pas un problème majeur lorsque l'on dispose de données thermiques avec une résolution suffisante. Malgré l'absence d'un épilimnion installé sur un métalimnion et un hypolimnion aux échelles saisonnières, les calculs de stabilité sont réalisables en étang et donnent des résultats satisfaisants. L'étude des indicateurs dans leur composante temporelle apporte un résultat cohérent sur les périodes de stratification et leur force. En revanche, dans l'aspect vertical, l'évolution rapide de la température au sein de la colonne d'eau entraîne un mouvement permanent de la thermocline difficilement mesurable dans le temps.

Afin d'appliquer la méthodologie de calcul du bilan thermique, l'analyse de trois étangs sera établie dans le chapitre suivant, afin d'étudier l'évolution de la dynamique thermique des étangs à morphologies variées.

Chapitre 4 : Le bilan thermique des petits plans d'eau

4.1 Le bilan thermique d'étang comme modèle de fonctionnement

L'étang a une dynamique thermique qui lui est propre, entre la dynamique journalière de la mare et celle saisonnière du lac (Touchart, 2007). Par sa faible profondeur il a souvent été comparé au fonctionnement de l'épilimnion d'un lac (Hakanson, 1995). Dans cette optique, l'étang a longtemps été considéré comme homotherme d'un point de vue vertical et horizontal, avant les premières mesures en continu au sein de la colonne d'eau stagnante démontrant des phases de stratification directes et indirectes de plusieurs jours (Touchart, 2002, 2007, 2016, Folkard *et al.*, 2010). Les premières connaissances de l'évolution de la température et, plus globalement, du bilan thermique des étangs ont montré une particularité temporelle et géographique de ce milieu. L'étang a un fonctionnement distinct de ses voisins limnologiques, mais des distinctions existent également au sein des étangs en fonction de leur profondeur, de la course du vent, des liens hydrologiques et de la localisation géographique. On peut cependant établir un fonctionnement thermique propre à l'étang que l'on va tenter d'analyser à partir des données sur trois sites d'étude en extrayant un modèle de fonctionnement stagnante. Ce modèle n'est autre que la généralisation de l'étude de trois étangs à morphologies variées, allant du très petit étang profond, au grand étang multilobé, afin de définir l'évolution du bilan thermique et de la structure thermique des trois étangs comme une référence, appelée modèle étang.

4.1.1 Evolution générale du bilan thermique de l'étang en tant qu'individu limnique distinct du lac

Les premières études du bilan thermique d'étang (Touchart, 2016) mettent en évidence un milieu particulier, où certaines méthodologies et approches lacustres ne peuvent pas être appliquées. Le fonctionnement thermique stagnante est propre aux étangs, caractérisés par des phases de stratification sur plusieurs jours interrompues par de brèves périodes de brassages. Ces alternances de brassages et de stratification sont la particularité des plans d'eau polymictiques discontinus (Lewis, 1983). La profondeur est le discriminant majeur entre le lac et l'étang (Touchart, 2007, Oertli et Frossard, 2013), facteur de détermination entre une monomicticité ou dimicticité et une polymicticité. Le fonctionnement thermique étant le moteur de la vie aquatique, par la mise en place et la

destruction de la stratification, la connaissance du fonctionnement stagnustre est fondamentale et ne peut pas être décrit simplement comme la partie supérieure d'un lac.

4.1.1.1 Un modèle de bilan thermique basé sur l'analyse de trois étangs sur une année

Les mesures effectuées lors de l'année 2018 sont communes aux trois étangs et permettent de faire ressortir des tendances d'évolutions générales du bilan thermique d'étangs.

Le bilan thermique annuel des trois étangs étudiés, situés dans les départements de la Haute-Vienne, de la Creuse et de la Moselle, est relativement proche, allant d'un minimum de 2 941 cal/cm² pour l'étang de Baerenthal à 3 834 cal/cm² pour celui de Rilhac, et 3 343 cal/cm² pour l'étang de la Ramade, sur la même année 2018, soit un bilan thermique stagnustre moyen de 3 370 cal/cm².

Si l'on se réfère aux caractéristiques climatiques de l'année 2018, nous sommes proches des maxima actuels, avec un hiver froid et un été chaud et sec. Les températures des étangs étudiés au début de l'année 2018 sont particulièrement élevées, principalement sur le mois de janvier. Des valeurs de la fin du mois de janvier sont équivalentes à celles de la première moitié de mars. La chute calorifique a eu lieu en février, atteignant les valeurs minimales. Du 1^{er} au 18 mars 2018, les étangs ont connu une augmentation calorifique importante, d'une moyenne de 1 000 cal/cm² sur les trois étangs. Il s'en est suivi une phase de diminution avant la grande hausse calorifique printanière et estivale.

Cette phase d'augmentation calorifique printanière est la période de gain calorifique le plus important. C'est le « *summer heat income* » de Birge (1915), prenant en compte le gain calorifique à partir de l'homothermie à 4°C. Pour nos étangs, le *summer heat income* est relativement proche du bilan thermique, avec des valeurs respectives de 2 585, 3 028 et 3 858 cal/cm² pour les étangs de Baerenthal, la Ramade et Rilhac, sur l'année 2018. L'écart entre le bilan thermique annuel et le *summer heat income* est d'en moyenne 380 cal/cm² pour les trois étangs. Ces 380 cal/cm² de moyenne sont considérés comme le « *winter heat income* » de Hutchinson (1957), soit la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'eau de son minimum à 4°C. Pour les étangs, la valeur du *winter heat income* est faible, comparée aux grands lacs des hautes latitudes. Les 380 cal/cm² de moyenne sont

absorbées en quelques jours afin d'atteindre une homothermie rapide à la fin de l'hiver et au début du printemps.

La période de gain maximal calorifique a lieu au printemps sur les étangs étudiés, avec un gain moyen pour les trois étangs de $1\,840\text{ cal/cm}^2$ du 23 mars au 24 avril 2018, soit environ $60\text{ cal/cm}^2/\text{jour}$. Les phases courtes de gain calorifique maximal, traduit par les plus fortes amplitudes, a lieu de fin avril à début juillet. A partir de juillet, une certaine inertie calorifique se crée et les amplitudes de gains ou de pertes sont faibles. Du 1^{er} juillet au 23 août 2018, l'écart calorifique est de seulement 239 cal/cm^2 en moyenne sur les trois étangs, avec une amplitude maximale d'environ 500 cal/cm^2 .

A l'échelle saisonnière, l'évolution moyenne sur un mois printanier peut dépasser les $1\,000\text{ cal/cm}^2$. L'amplitude journalière est elle aussi conséquente, avec une amplitude maximale de 668 cal/cm^2 le 20 juin sur l'étang de la Ramade, entre 7h et 17h GMT+2. Les gains journaliers viennent s'additionner à ceux emmagasinés pendant une période plus longue. Ils sont majoritairement influencés par les interactions à l'interface eau-air. Les gains journaliers sont très variables, de plusieurs centaines de calories jusqu'à un gain très réduit durant l'été. La contenance journalière maximale calorifique se situe généralement en fin de journée, entre 18h et 20h. Elle est en décalage avec le maximum de radiation solaire ainsi qu'avec les maxima rencontrés dans les cycles thermiques des petits cours d'eau, plus proches de 12-14h.

Quand pour les grands lacs le bilan thermique peut dépasser les dizaines de milliers de calories par centimètres carrés d'eau sous nos latitudes, il ne dépasse que rarement $5\,000\text{ cal/cm}^2$ pour les étangs les plus profonds, calculé à une moyenne de $3\,370\text{ cal/cm}^2$ sur l'année 2018 à partir de trois étangs. A titre d'exemple, le Léman a un bilan thermique proche des $40\,000\text{ cal/cm}^2$ (Hutchinson, 1957), tandis que l'étang limousin le plus profond, l'étang de la Pouge, ne dépasse pas les $4\,500\text{ cal/cm}^2$ (Touchart, 2016) et peut, avec ses 6 m de profondeur maximale, être considéré comme la limite haute des étangs.

4.1.1.2 Les composantes du bilan thermique d'étang

Les plans d'eau peu profonds caractérisés par leur polymicticité sont connus pour avoir une réponse plus rapide face aux conditions atmosphériques que les grands lacs (Dellebecque, 1898, Magee et Wu, 2017). Autrement dit, les étangs et autres plans d'eau

polymictiques sont plus influencés par les processus de convection libre (appelée « gentler » par Horne et Goldman, 1983, p.20), tandis que la dynamique lacustre est influencée par la convection forcée, soit par le vent (Horne et Goldman, 1983). Les études restent complexes à des échelles globales, avec l'intervention de nombreux facteurs pouvant modifier la température de l'eau et son bilan thermique, tels que la morphologie, la course du vent, les échanges hydrologiques avec des cours d'eau ou la nappe souterraine (Shimoda *et al.*, 2011, Magee & Wu, 2017). La quasi absence d'études de corrélations entre les conditions atmosphériques et le bilan thermique des étangs (Touchart, 2016) nous pousse à une première analyse. Bien que largement critiquable par le faible nombre d'étangs utilisés, elle n'en reste pas moins une première étape dans la connaissance de ces plans d'eau et de leur évolution thermique future.

Approche analytique du bilan thermique

La part climatique du bilan thermique est dominante en lac (Wetzel, 1983, Touchart, 2002). Elle se compose du bilan de chaleur sensible, latent, et du bilan radiatif. Pour connaître le bilan thermique stagnustre de façon analytique, avec une analyse séparée des différents éléments apportant et enlevant des calories au plan d'eau, une modélisation de l'étang de la Ramade a été effectuée sur cinq mois de l'année 2016²⁵ à l'échelle journalière. Les données sources sont issues de la station météo à proximité de l'étang, ainsi que des données thermiques de la chaîne de thermomètres au niveau du point le plus profond. Cette analyse permet de comprendre les principaux apports et pertes calorifiques.

Le bilan radiatif est, comme en lac, l'apport majeur de calories au plan d'eau. Ses apports maximum journaliers variant entre 1^E13 et 1,5^E13 calories en moyenne. Le bilan de chaleur sensible est le second terme apportant des calories à l'étang. Il est généralement négatif à l'échelle journalière et hors période hivernale et automnale, ce qui signifie que la température de l'eau est plus chaude que celle de l'air à l'échelle journalière. Enfin, le bilan de chaleur latente, caractérisé par l'évaporation, est le facteur prélevant le plus de calories au plan d'eau. Par le réchauffement important des eaux de surface, l'évaporation enlève une quantité importante de calories aux étangs (Figure 34).

²⁵La modélisation a été effectuée par le pôle Plan d'eau ONEMA-IRSTEA d'Aix en Provence, à partir du modèle GLM.

Le bilan radiatif est la source principale de calories. Il varie assez peu dans l'année et dépend des conditions météorologiques. C'est aux alentours des solstices d'été et d'hiver que la somme du bilan radiatif peut être maximale ou minimale, liée à la durée de l'ensoleillement journalier. D'avril à septembre 2016, le maximum de radiation solaire journalier a eu lieu aux alentours du 19 juillet 2016 et non lors du solstice d'été. La période du solstice d'été, à la fin du mois de juin, était de type dépressionnaire avec un faible ensoleillement, ne favorisant pas les pics de radiation solaire. Le maximum de bilan thermique quant à lui n'a pas eu lieu lors du maximum de radiation solaire journalier, puisqu'il a eu lieu au début du mois d'août, lors du maximum de température de l'air. La contenance calorifique ne semble pas réellement suivre la courbe de celle du rayonnement mais plus probablement celle du bilan de chaleur sensible (Figure 34).

Lorsque le bilan de chaleur sensible est positif, ou lorsqu'il est très faiblement négatif, la contenance calorifique de l'étang est à son maximum. C'est le cas au début du mois de juillet et durant le mois d'août 2016 sur l'étang de la Ramade. A la fin de l'été, la contenance calorifique reste élevée malgré la diminution des apports par radiation. Le bilan de chaleur sensible, quant à lui, reste élevé lors de cette période et permet des phases de gain calorifiques pour le plan d'eau. Par contre, le bilan de chaleur latente diminue et permet également une accumulation plus importante de chaleur liée à de plus faibles pertes par évaporation.

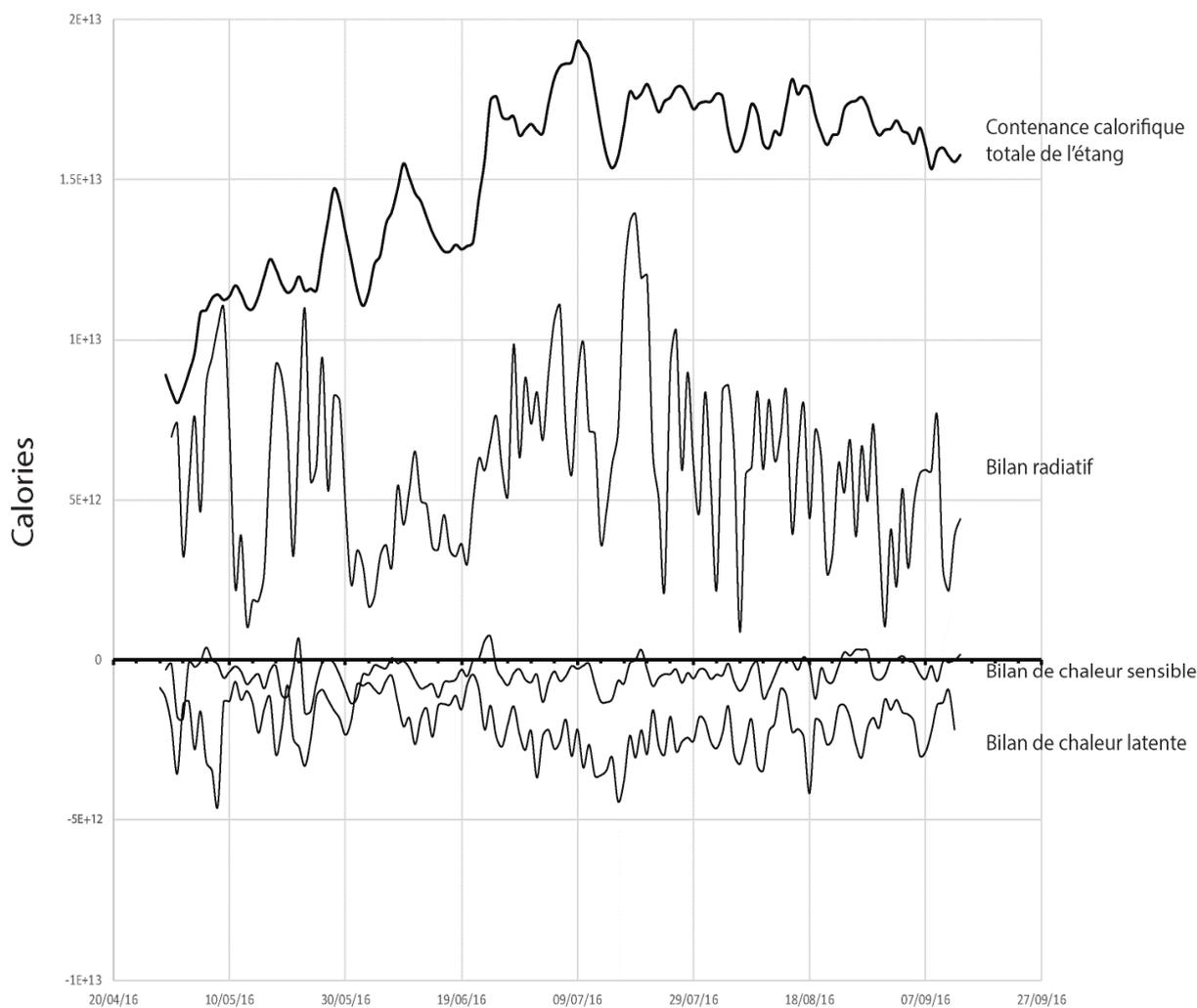


Figure 34: Etude analytique de la contenance calorifique d'un plan d'eau. Etang de la Ramade, avril à septembre 2016. Modélisation: J. Prats, 2016 . Q. Choffel, 2019

D'un point de vue analytique, le bilan radiatif est la source majeure brute d'apports calorifiques à l'étang. En importance relative, les pics de bilan thermique ont lieu lorsque le bilan de chaleur sensible est positif et élevé, confirmant l'importance de l'influence des températures de l'air sur le bilan thermique.

Les liens entre température de l'air et de l'eau en étang

Les données thermiques des étangs sur les trois années étudiées ont été comparées avec celles des stations Météo France au plus proche des étangs dans le but d'analyser les corrélations entre la température de l'air et celle de l'étang. Cette analyse a été effectuée pour chacun des trois étangs, ainsi que pour le cours d'eau de la Zinsel du Nord, en amont de

tout étang, dont celui de Baerenthal. Ce petit cours d'eau forestier de tête de bassin permettra d'affiner les analyses.

Les corrélations entre la température de l'air et le bilan thermique des étangs sont forts, avec un coefficient de détermination R^2 variant de 0,78 pour l'étang de Rilhac à 0,89 sur l'étang de Baerenthal, ainsi que 0,84 pour l'étang de la Ramade. Le cours d'eau de la Zinsel du Nord, quant à lui, affiche un coefficient de détermination R^2 de 0,93 entre la température de l'air et celle de l'eau²⁶ (Figure 35). A première vue, il semble évident que l'étang le plus profond a le coefficient de détermination le plus faible, tandis que l'étang le moins profond a le plus fort. Pour confirmer, le petit cours d'eau de tête de bassin affiche une corrélation encore plus importante.

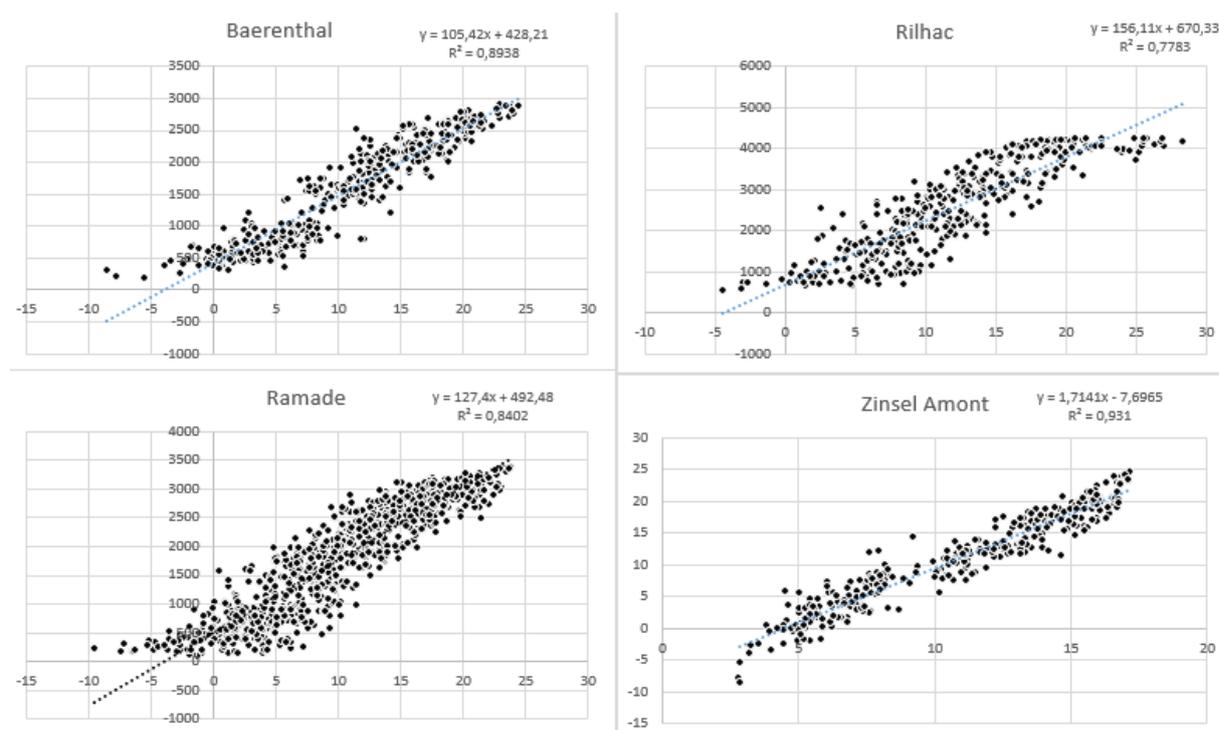


Figure 35: Analyse de corrélation entre la température de l'air et la contenance calorifique des plans d'eau étudiés

Cette corrélation entre la température de l'air et le bilan thermique semble lié à la morphologie du plan d'eau et principalement à sa profondeur maximale. L'étang de Rilhac, avec 4,2 m de profondeur maximale, est le moins corrélé avec la température de l'air, tandis

²⁶Pour le cours d'eau de la Zinsel, son faible volume a amené à ne prendre que la température de l'eau en un point et non pas le bilan thermique comme pour les plans d'eau étudiés.

que Baerenthal, avec 2,2 m de profondeur max l'est le plus. L'étang de la Ramade et ses 3 m de profondeur maximale se situe entre les deux précédents

La corrélation entre la température de l'air et la contenance calorifique de l'étang diffère pour les valeurs de fortes températures de l'air pour Rilhac, à l'inverse des deux autres étangs. Sur l'étang de Rilhac, il semblerait qu'un seuil de bilan thermique soit atteint, alors que l'augmentation des températures de l'air perdure, à partir d'une vingtaine de degrés de moyenne journalière. Malgré l'évolution positive des températures de l'air, l'étang ne connaît pas une augmentation similaire de sa contenance calorifique. Ce phénomène peut être lié au fonctionnement des couches de fond lors de stratification thermique. Durant l'été, la couche de fond de l'étang de Rilhac est isolée de celle de surface. Les strates de 1,5 à 4,2 m ne bénéficient pas ou peu d'apport calorifique de la surface et restent à une température stable, proche des 15 à 18°C selon les années et le moment dans la période estivale. C'est la forte profondeur relative qui crée ce phénomène, accentué par la faible course du vent ne permettant pas d'apporter des calories vers le fond. L'étang de Rilhac a un fonctionnement se rapprochant d'un petit lac et diffère plus fortement de la dynamique thermique atmosphérique par l'isolement de la couche de fond comparée aux deux autres étangs.

Les gains et les pertes calorifiques se font à la surface majoritairement, par échange de chaleur spécifique et évaporation. Lorsque la température de l'air est supérieure à celle de l'eau, la première va réchauffer la seconde et engendrer un gain calorifique pour l'étang. A l'inverse, l'étang va réchauffer l'air et perdre de l'énergie. Les autres pertes majeures se font par évaporation, dont l'étude a largement été développée par Al Domany (2017). La contenance calorifique des étangs suit de très près l'évolution de la température de l'air. Cette relation est d'autant plus vraie que le plan d'eau est peu profond. Enfin, ces analyses confirment l'hypothèse de Goldman & Horne (1983) mettant en avant la dépendance des lacs aux convections mécaniques et les étangs aux convections libres, se rapprochant plus des cours d'eau.

Les étangs ont un volume réduit comparé aux lacs ce qui engendre une importance relative plus forte des facteurs du bilan thermique estimés secondaires pour les lacs (Dussart, 1966). Les gains et pertes par les sédiments (Ragotskie, 1978, Wetzel, 1983), et les composantes hydrologiques (Touchart, 2007) peuvent avoir une valeur relative importante en étang.

4.1.1.3 La part hydrologique du bilan thermique stagnustre

Le bilan calorifique hydrologique regroupe l'ensemble des transferts d'énergie à partir des échanges hydrologiques par voie fluviale ou souterraine. Il est constitué des échanges thermiques ayant lieu au niveau des affluents et effluents, par la nappe souterraine ou encore par ruissellement pour les étangs non connectés directement au réseau hydrographique.

Part fluviale du bilan thermique d'un étang

La part fluviale du bilan thermique occupe en général une place assez réduite en lac par rapport à la partie climatique (Touchart, 2002). Pour les étangs situés sur des cours, avec un affluent et un émissaire au minimum, la part du bilan hydrologique fluvial peut avoir un rôle important dans le bilan thermique. Le rôle calorifique des affluents d'un plan d'eau est d'autant plus grand que le temps de séjour des eaux est court (Barbanti & Ambrosetti, 1989), que le plan d'eau est soumis à son bassin versant et que les écarts thermiques entre la température du cours d'eau et celle du plan d'eau sont importants (Touchart, 2002).

Les mesures de débit mensuelles²⁷ à l'amont et à l'aval de l'étang de Baerenthal complètent les données thermiques pour l'établissement d'un bilan thermique fluvial de l'étang sur l'année 2017/2018.

Le bilan thermique fluvial de l'étang de Baerenthal

La part du bilan fluvial dans le bilan thermique de l'étang de Baerenthal est négative, avec une perte calorifique estimée à $-17\,089\text{ cal/cm}^2/\text{an}$. Ce bilan n'est pas réparti de façon homogène au cours de l'année, puisqu'il est positif pour l'étang en période hivernale et négatif en période estivale (Tableau 5). Les périodes intermédiaires aux alentours de mars pour le printemps et de novembre pour l'automne sont à l'équilibre entre les calories entrant et sortant de l'étang par voie hydrologique. Les pertes et gains calorifiques dépendent des débits et des écarts de température entre le tributaire et l'émissaire. Sur l'année 2017/2018, le maximum de gain pour l'étang a été enregistré sur la période de février. Les débits importants sont la cause majeure d'apport calorifique avec des écarts de température assez réduits mais suffisants pour créer un gain conséquent à l'étang. A l'inverse, les pertes les plus fortes ont eu lieu en mai, où les débits du cours d'eau aval sont largement supérieurs à ceux

²⁷Mesures réalisées par Alban Cairault, PNR Des Vosges du Nord, dans le cadre du suivi des cours d'eau.

du cours d'eau entrant. Un écart de près de 100 L/s a été mesuré entre les deux stations sur le mois de mai. Cette différence de débit majeure, combinée avec des écarts thermiques commençant à s'établir, fait du mois de mai de l'année 2018 une perte calorifique fluviale importante pour l'étang. A débits quasi similaires, les mois d'août, septembre et octobre sont caractérisés par une perte calorifique conséquente liée à la fin de l'été particulièrement chaude et à l'inertie thermique des eaux de l'étang. Dans le même temps, la baisse des températures atmosphériques entraîne un refroidissement plus rapide du cours d'eau amont ce qui augmente les écarts thermiques avec l'étang.

Tableau 5: Bilan calorifique fluvial de l'étang de Baerenthal

Mois	Apports de l'affluent (cal/s)	Export de l'effluent (cal/s)	Par fluviale du Bilan calorifique de l'étang (cal/cm ² /an)
Janvier	5 901 667	5 353 629	1 571
Février	3 790 986	3 215 738	1 649
Mars	4 225 146	4 211 527	39
Avril	6 823 586	7 923 503	-3 153
Mai	7 400 902	9 798 054	-6 872
Juin	6 153 973	6 196 410	- 122
Juillet	6 814 358	8 651 054	-5 266
Août	5 940 707	6 674 352	-2 103
Septembre	3 698 592	4 413 112	-2 048
Octobre	3 214 741	3 800 368	-1 679
Novembre	2 181 427	2 252 449	-204
Décembre	2 806 149	2 422 930	1 099
Année 2017/2018			-17089

Les valeurs obtenues sont proches de celles mesurées sur un petit étang du Limousin, le petit étang du Theil, avec un temps de séjour moyen de 4,2 jours (Touchart & Grafouillère, 2004) possédant un bilan thermique fluvial de -12 698 cal/cm²/an (Touchart, 2002), proche

de celui de Baerenthal dont le temps de séjour moyen est de 3,2 j. Avec un temps de séjour plus court, l'étang de Baerenthal a une part fluviale de son bilan thermique plus forte, représentée par une perte calorifique d'environ -17 000 calories/cm²/an.

Le bilan calorifique fluvial est une perte calorifique pour les étangs, dont la valeur dépend du temps de séjour. L'apport calorifique de l'affluent se localise en fonction de la densité du cours d'eau, s'intercalant dans les couches de densité similaires. En eau douce, la température et la charge sédimentaire du cours d'eau régissent sa densité et donc sa zone d'influence calorifique au sein du plan d'eau. L'arrivée d'un cours d'eau dans un étang avec un temps de séjour court peut influencer le bilan thermique de ce dernier. En fonction de la période de l'année, du débit et de l'écart thermique, cette influence sera plus ou moins forte. Enfin, l'influence peut être réduite d'un point de vue quantitatif mais avoir un impact localisé, augmentant l'hétérogénéité spatiale du bilan thermique du plan d'eau

Part souterraine dans le bilan thermique

La composante souterraine du bilan thermique est complexe à mesurer, demandant des mesures de débits de la part souterraine entrant et sortant du plan d'eau. En étang, la volonté d'avoir un terrain imperméable limite les échanges entre la nappe et le plan d'eau. Quelques étangs sont localisés sur source en tête de bassin, là où l'influence de la nappe est supposée importante. L'eau de nappe est à une température constante et va donc avoir un effet varié sur l'année hydrologique, dépendant de la température de l'étang. Durant l'hiver, la nappe arrive à une température constante pouvant être supérieure à celle du cours d'eau et va donc apporter de nombreuses calories susceptibles de modifier la contenance calorifique du plan d'eau ainsi que sa structure thermique. Une eau plus chaude, arrivée par le fond, va s'élever vers la surface et se disperser par les jeux de densités des masses d'eau. En été et lorsque la température de l'étang est supérieure à celle de la nappe, l'apport calorifique est moindre et la structure du plan d'eau sera peu perturbée. Les eaux froides arrivant au fond de l'étang vont être plaquées sur les couches profondes car plus denses que celles du plan d'eau. Dans ce cas, l'étude de la part des calories de la nappe est plus complexe d'un point de vue quantitatif et dans sa répartition géographique.

Rares sont les étangs influencés par la présence d'une source fournissant un débit suffisant pour apporter des modifications dans le bilan thermique. Les étangs sur source bénéficient généralement d'un débit assez faible, localisé en un point spécifique du plan

d'eau. L'analyse de l'influence de la nappe souterraine nous apporte notamment une connaissance de la répartition géographique de chaleur au sein du plan d'eau.

Cette question, laissée en suspens pour les trois étangs français étudiés dans cette thèse, pour lesquels la part des échanges souterrains est vraisemblablement très faible, a cependant donné lieu à un développement (III.6.3.2), où de petits plans d'eau estoniens ont justement été étudiés en partie en ce sens.

4.1.1.4 Variations interannuelles du bilan thermique

Sur les trois étangs étudiés, deux ont été analysés sur trois années, permettant d'ouvrir l'étude du bilan thermique à une échelle pluriannuelle, influencée par les effets météorologiques globaux. Nous disposons de données en continu sur l'étang de la Ramade depuis le 3 mars 2016 et l'étang de Rilhac à partir du 5 mai 2016. Sur ce dernier, les données de l'été 2017 n'ont pas pu être mesurées. Nous focaliserons notre attention sur le premier étang afin de comparer les conditions météorologiques et le bilan thermique sur les trois années étudiées.

Présentation climatique des trois années 2016, 2017 et 2018

La région du plateau de la Courtine a connu trois années distinctes d'un point de vue météorologique, entre 2016 et 2018. L'année 2016 peut être caractérisée par un printemps plutôt chaud et ensoleillé, avec un été dans les normales de saison, et un automne et un hiver plutôt froids. L'année 2017 est marquée par un hiver froid, avec des températures moyennes journalières négatives du 4 janvier au 10 février, entrecoupées par quelques jours faiblement positifs la deuxième semaine de janvier. Le printemps a été plutôt frais, tandis que l'été se résume à des alternances importantes de journées très chaudes et d'autres plus fraîches particulières à cette année (sur les trois étudiées). Enfin, la chaleur s'est décalée sur l'automne, avec une arrière-saison chaude, à l'inverse de l'année précédente. La période s'étalant de la mi-septembre à la mi-octobre a été particulièrement chaude, avec une température moyenne de 17,1 °C contre 9,8°C pour l'année 2016.

L'année 2018 a également connu une fin de saison chaude, avec une moyenne de 20,2°C du 15 septembre au 10 octobre 2018²⁸. Sur cette même année, le printemps a été chaud, avec une moyenne du mois d'avril à 15, 5°C ainsi qu'un été caniculaire, dont les maxima se sont fait ressentir en début et fin du mois d'août. Le mois d'août 2018 a connu une température moyenne de 17,8 °C, soit 1°C supérieur aux deux années précédentes. Sur ces trois années, c'est en juillet que l'on trouve les moyennes les plus élevées. Sur les deux mois de juillet et août, les trois années se suivent crescendo, avec des moyennes allant de 16,9°C pour l'année 2016, 17°C pour 2017 pour atteindre le maximum de 18,1 °C pour 2018, soit 1,2 °C supérieur en moyenne que 2016. Le maximum de température de l'air mesuré à proximité de l'étang de la Ramade est de 32,9 °C, le 19 juillet 2016, mesuré par une station météo installée sur la rive de l'étang. En 2017, la température maximale a été observée le 22 juin avec 32,3 °C, et le 6 août pour l'année 2018 avec 32,2 °C. Les trois maxima ont été observés sur trois mois différents, de juin à août, à la station météoFrance de la Courtine²⁹ (Figure 36).

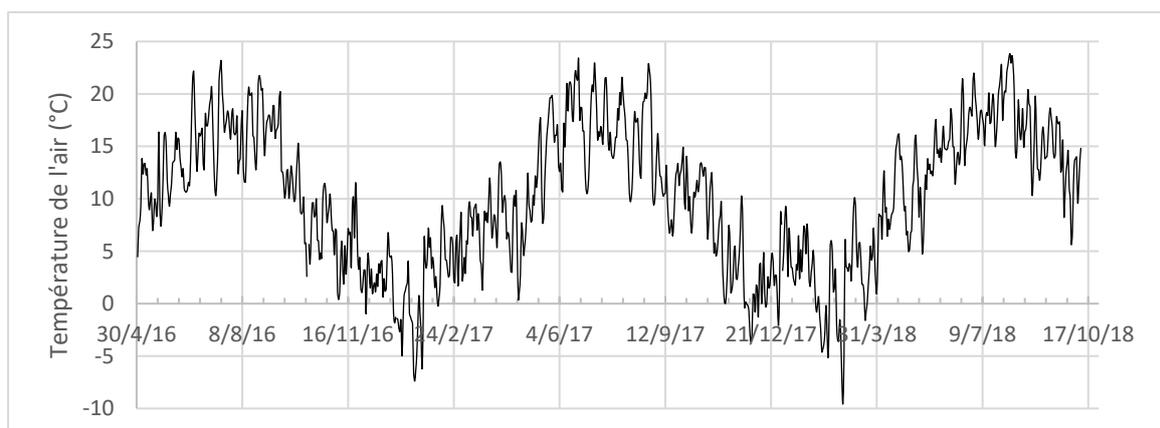


Figure 36: Températures moyennes journalières à la station Météo France de la Courtine, du 1er mai 2016 au 10 octobre 2018

Evolution du bilan thermique sur les années 2016, 2017 et 2018

Le bilan thermique de l'étang de la Ramade connaît une variation interannuelle de 4,72 % entre son bilan thermique annuel maximum de 2017 et ceux minimum de 2016 et 2018. Cet écart représente une différence de 166 cal/cm², ce qui reste relativement faible. L'écart est dû à une contenance calorifique horaire élevée le 22 juin 2017 dépassant celles

²⁸La moyenne ne peut s'appliquer jusqu'au 15 octobre car les mesures ont été arrêtées le 10 octobre 2018.

²⁹ Les données météorologiques sur trois années sont celles de la station météoFrance de la Courtine afin d'obtenir des valeurs complètes sur trois années. La station installée sur la rive de l'étang a eu des absences de données et des détériorations ne permettant pas d'utiliser la totalité des mesures.

des deux autres années, et à une contenance minimale faible, avec 75 cal/cm² durant l'hiver 2017 Cette contenance minimale reste plus élevée que lors du mois de décembre 2016 avec seulement 25 cal/cm² lors d'une forte prise en glace de l'étang (Tableau 6).

Tableau 6: Variation interannuelle des maximum, minimum et du bilan thermique de l'étang de la Ramade

	2016	2017	2018
Minimum calorifique horaire (cal/cm²)	25	75	185
Maximum calorifique horaire (cal/cm²)	3379	3595	3539
Bilan thermique (cal/cm²)	3354	3520	3354

Le maximum calorifique de l'étang sur les trois années peut s'expliquer par la conjonction d'une forte température de l'air et d'un rayonnement solaire maximum dans sa durée puisque arrivé le 22 juin 2017, soit proche du maximum de rayonnement solaire du solstice d'été. L'année 2017 est la seule, sur les trois années étudiées, où le maximum de rayonnement solaire possible coïncide avec le maximum de température de l'air. Les autres années, le bilan thermique se caractérise par des variations d'amplitudes fortes au début de l'été puis un maintien de calories importantes sur l'ensemble de l'été au début de l'automne. Des valeurs hors-saisons très élevées ont pu être mesurées lors du mois d'avril 2017, avec 2 316 cal/cm² le 13 avril, ou encore 2 443 cal/cm² le 26 avril 2018. Les journées douces sont décalées vers septembre et octobre avec un maximum de fin de saison en septembre 2018, avec 2673 cal/cm² par exemple le 13 septembre 2018.

Chaque année la contenance calorifique de l'étang diminue à partir de fin août mais connaît un léger regain en septembre, dû aux conditions météorologiques favorables de ce climat hyperocéanique. Les valeurs d'octobre également sont généralement douces, avec des valeurs de 2 215 cal/cm² le 13 octobre 2017, ou encore 2 148 cal/cm² le 11 octobre 2018 (Figure 37), pour ce qui fut un mois d'octobre exceptionnellement plus chaud que la normale.

Les conditions météorologiques influencent directement le bilan thermique de l'étang à l'image de son évolution temporelle, parfois avec de fortes amplitudes estivales, parfois suivant une certaine constante avec une accumulation décalée au début de l'automne, ou anticipée à la fin du printemps (Figure 37).

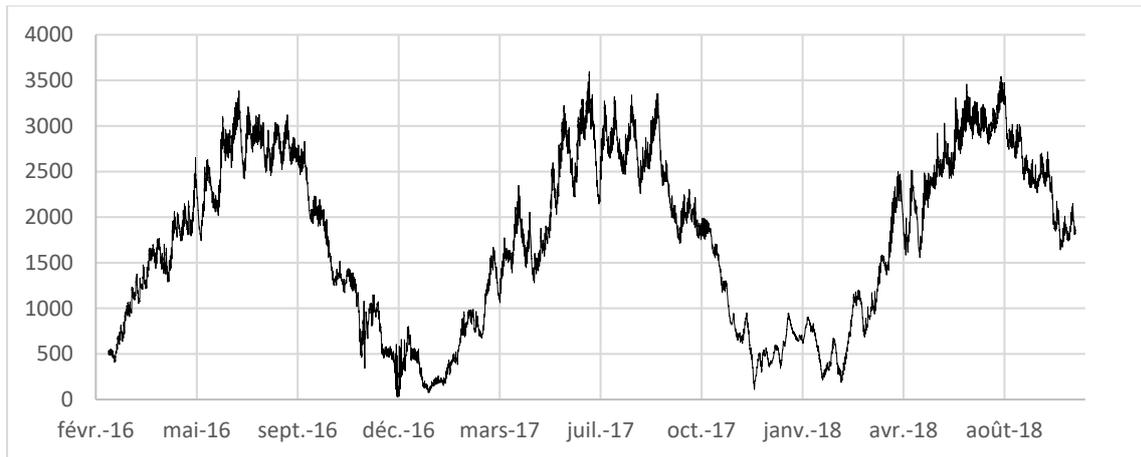


Figure 37: Evolution horaire de la contenance calorifique de mars 2016 à octobre 2018 sur l'étang de la Ramade

Les écarts bruts de bilan thermique entre les trois années sont inférieurs à 5%. La variation interannuelle du bilan thermique de l'étang est essentiellement liée à la variation de la température de l'air (majoritairement), dictant les conditions de la contenance calorifique des plans d'eau peu profonds. Cependant, le rayonnement solaire joue un rôle également conséquent puisque la contenance calorifique du plan d'eau sera d'autant plus élevée que le maximum de température de l'air sera proche de celui du rayonnement solaire, au moins dans sa durée, soit aux alentours du solstice d'été.

4.1.2 Stratification thermique et stabilité en étang

Les phases de stratification thermique en étang sont courtes, allant de quelques heures à plusieurs dizaines de jours pour les moins profonds, et jusqu'à plusieurs mois pour ceux dont la profondeur relative est très forte. Sur les trois étangs étudiés, des tendances similaires d'établissement et de destruction de la stratification ont pu être observées.

Les écarts thermiques entre la surface et le fond des trois étangs étudiés peuvent atteindre des valeurs conséquentes, dépassant les 14°C entre la surface et 2,5 m correspondant à un gradient thermique élevé de -5,6°C/m, tandis qu'ils dépassent rarement les -2°C/m en lac (Hutchinson, 1957, Goldman et Horne, 1983, Wetzel, 1983). Lors des phases de stratification, les écarts thermiques entre la surface et le fond sont régulièrement supérieurs à 5°C. L'écart moyen de température surface-fond est d'environ 2°C sur l'année, allant jusqu'à plus de 3°C sur la période estivale (juin à septembre). Malgré leur faible profondeur, les étangs affichent des gradients thermiques élevés entre une surface

surchauffée et le fond. Sur quelques mètres, les écarts thermiques et de densité entre la surface et le fond sont relativement plus importants qu'en lac.

La stabilité des étangs, soit la capacité de la colonne d'eau à résister à la force de destruction de la stratification, est faible, dépassant rarement les 15 W/m² en moyenne, contre des valeurs de plus de 2 500 W/m² pour des lacs profonds (Hutchinson, 1957). Elle dépend de la profondeur, de la longueur du fetch et de la température, mais les faibles valeurs sont avant tout liées au volume réduit des étangs. Plus un plan d'eau est profond et possède un fetch réduit, plus il peut développer une capacité à résister au brassage forcé.

Les étangs ont une profondeur suffisante pour emmagasiner de la chaleur et lutter contre le brassage convectif journalier, mais elle reste trop réduite pour développer une forte stratification saisonnière. Durant le printemps, les stratifications thermiques sont journalières. Le refroidissement nocturne entraîne le brassage de la masse d'eau par convection libre. Entre fin mai et début juin, selon les années, la stabilité journalière augmente et parvient à lutter contre le refroidissement convectif nocturne sur une période de 2 à 3 jours. Les périodes de stratifications augmentent pour atteindre leur maximum à la fin du mois de juin et au début du mois de juillet. Les périodes de stratification s'étendent sur des moyennes d'environ 10 jours (Figure 38) pour les étangs à profondeur moyenne autour d'1 m. Toutes les décades, les perturbations océaniques entraînent le brassage de la colonne d'eau par l'action simultanée du vent et le refroidissement de l'air.

Certains étangs avec une forte profondeur relative et un fetch limité, caractérisés par un indice de creux élevé, peuvent lutter contre cette occurrence dépressionnaire, bien qu'ils subissent généralement au moins un brassage estival. Ces plans d'eau profonds ont un fonctionnement qui se situe entre le modèle stagnustre et le celui lacustre. Au-delà des 2 m de profondeur maximale, la profondeur peut être suffisante, si le fetch est réduit, pour limiter les échanges entre la surface et le fond, et entraîner des stratifications sur plusieurs mois. Sa force permet de maintenir une structure thermique en deux couches distinctes et durables.

L'éloignement du maximum de radiation solaire et le raccourcissement des temps d'ensoleillement provoquent une réduction de la stabilité des étangs à la fin de l'été. Ces derniers sont plus exposés au refroidissement nocturne. Leurs phases de stratification durent quelques jours, dépassant rarement la semaine, malgré parfois de fortes températures de

l'air. Dès la fin de l'été, en septembre, la stratification thermique s'établit de plus en plus difficilement, contrainte par la diminution des températures de l'eau et de l'air, et limitée par un rayonnement solaire de plus en plus réduit. Certaines arrière-saisons chaudes et ensoleillées ne suffisent pas à établir de réelles périodes de stratification longues et durables.

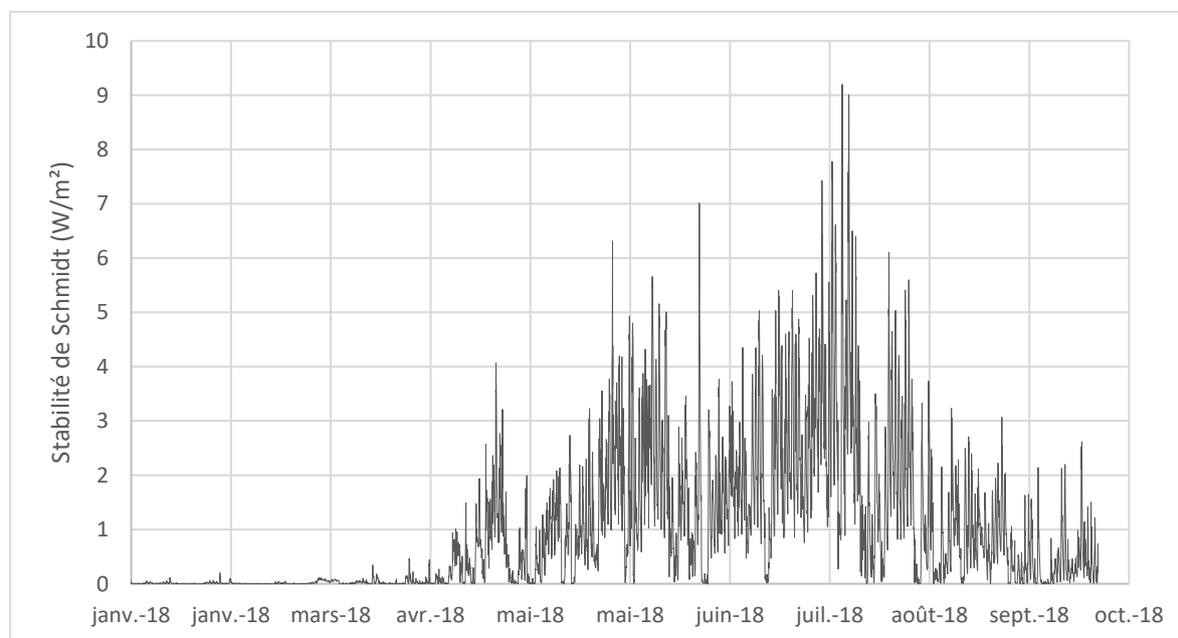


Figure 38: Somme des stabilités dans un étang de 2,5 m de profondeur maximale. Étang de Baerenthal, Q. Choffel

Il existe également en étang une couche de mélange, identifiée dans l'épilimnion des lacs (« *mixed layer* », Imberger, 1985). Cette couche, de même qu'en lac, se réchauffe, se stratifie, puis, à l'aide des facteurs externes, la chaleur est diffusée en profondeur de manière forcée par la brise, avant de se refroidir lors de la période nocturne. En lac, la couche de mélange est une partie importante de l'épilimnion, sur plusieurs mètres de profondeurs parfois. De fait, il a longtemps été admis que les étangs ont un fonctionnement similaire à cette couche de mélange par leur faible profondeur. Or, à l'intérieur des étangs, cette couche est également présente sur les premiers centimètres. Sur le graphique représentatif du 7 juillet 2018 (Figure 39), la couche de mélange stagnante se développe sur les 40 premiers centimètres environ. Ces 40 premiers centimètres sont soumis à de petites stratifications au sein de l'épistagnion et à un brassage nocturne. Ce brassage n'affecte pas toute la colonne d'eau mais se concentre sur les premiers centimètres. En début de soirée, la température à la surface immédiate est refroidie et descend en profondeur, affectant les premiers centimètres puis l'ensemble de l'épistagnion (Figure 39).

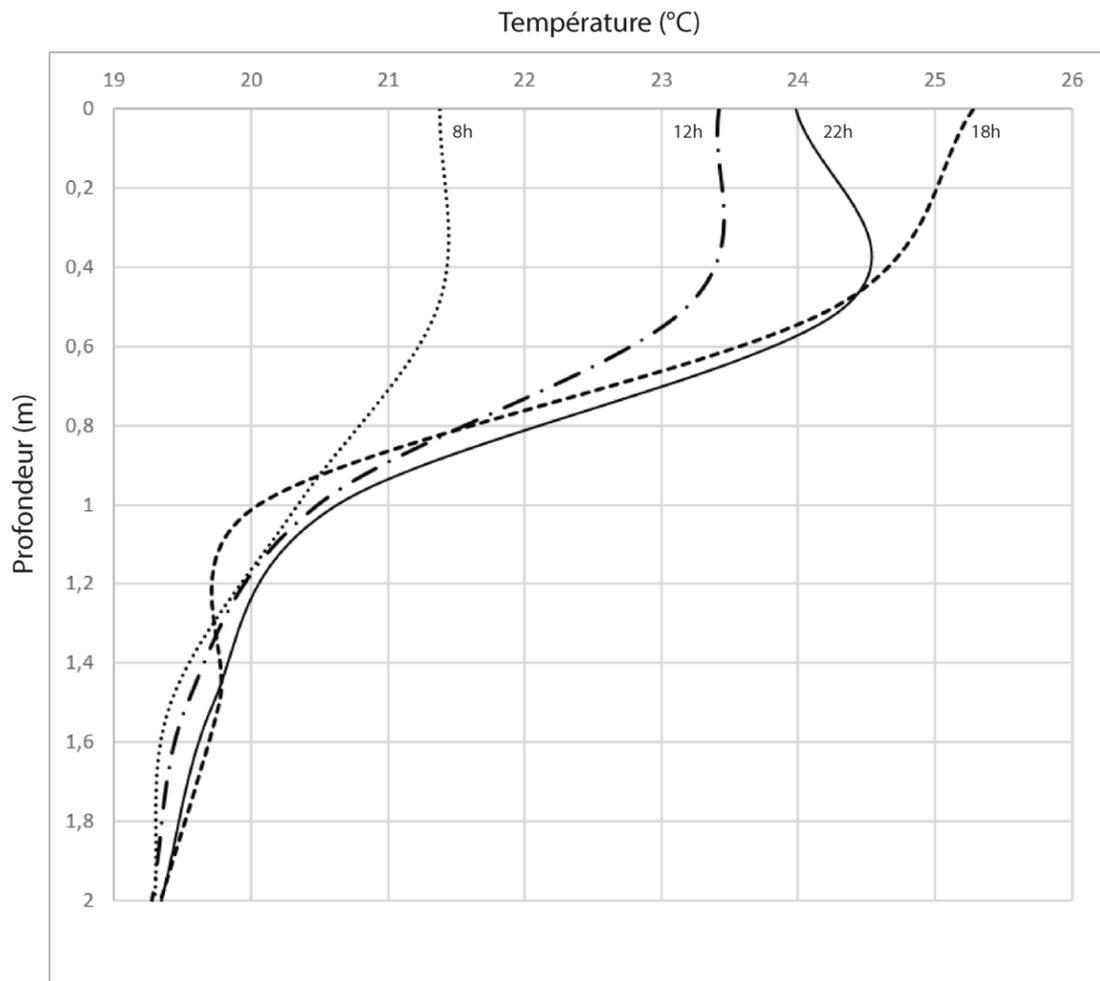


Figure 39: Profils thermiques à plusieurs instants de la journée, étang de Baerenthal, 7 Juillet 2018

On observe en étang ce qu'il a été décrit dans un lac, soit une structure thermique en trois couches avec une couche de mélange affectant les premiers centimètres. Les étangs ne sont pas une troncature du lac réduit à son épilimnion du fait de sa faible profondeur, mais bien un petit lac avec un fonctionnement proche mais à une échelle plus réduite.

Les alternances des phases de stratification et de brassage sont la caractéristique première de ces milieux stagnustres. Les effets de cette alternance se mesurent sur le bilan thermique et notamment par le transfert de calories vers les couches de fond.

4.1.2.1 L'importance de la couche de fond dans les échanges calorifiques des étangs

En lac, la présence d'une thermocline forte isole la couche hypolimnion. La température y est constante et correspond à la température du lac avec l'établissement de la stratification. En étang, cette couche est bien évidemment moins profonde, se limitant à quelques mètres au maximum, mais la présence d'une thermocline a permis de la nommer hypostagnion pour sa ressemblance avec l'hypolimnion du lac mais englobant ses

particularités stagnustres (Touchart, 2007). Au printemps, la température du lac en homothermie va déterminer la température des couches de fond une fois la stratification thermique établie. En étang, l'alternance de phases de brassage et de stratification est l'élément fondamental déclenchant l'apport régulier de calories dans les couches profondes.

La courbe de température de la couche de fond (mesurée à 2 ou 2,5 m de profondeur) suit celle des phases de stratification et de brassage. A l'inverse de la couche de surface, c'est lors des brassages que la couche de fond va gagner en température. Lors de la phase de stratification thermique directe, la chaleur s'accumule à la surface. L'action du vent sur la colonne d'eau va déplacer ces calories accumulées de la surface vers le fond. Si la convection forcée est suffisamment importante, l'étang sera brassé entièrement. Il n'est donc pas rare que la température de fond dépasse les 20°C. Des valeurs allant jusqu'à plus de 25°C ont été mesurées sur les étangs à plus de 2m de profondeur, alors qu'elle se rapproche de la température de densité maximale, à 4°C, dans les lacs profonds. La température de fond reste stable puis évolue par pics rapides, avant de retrouver une valeur stable de quelques degrés supérieure à la phase précédente (Figure 40).

C'est au printemps que son évolution est la plus rapide. Pendant la période estivale, la couche de fond ne connaît un gain de température que ponctuel et rapide, lors des phases de brassage. La courbe n'est cependant pas parfaitement droite, une augmentation, bien que très faible, se produit même lorsque l'étang est stratifié. Ces gains se réduisent à environ 1 à 2°C par mois. Cela démontre que la thermocline d'étang n'est pas complètement hermétique et laisse passer quelques calories de la surface vers le fond, lié au processus lent de conduction.

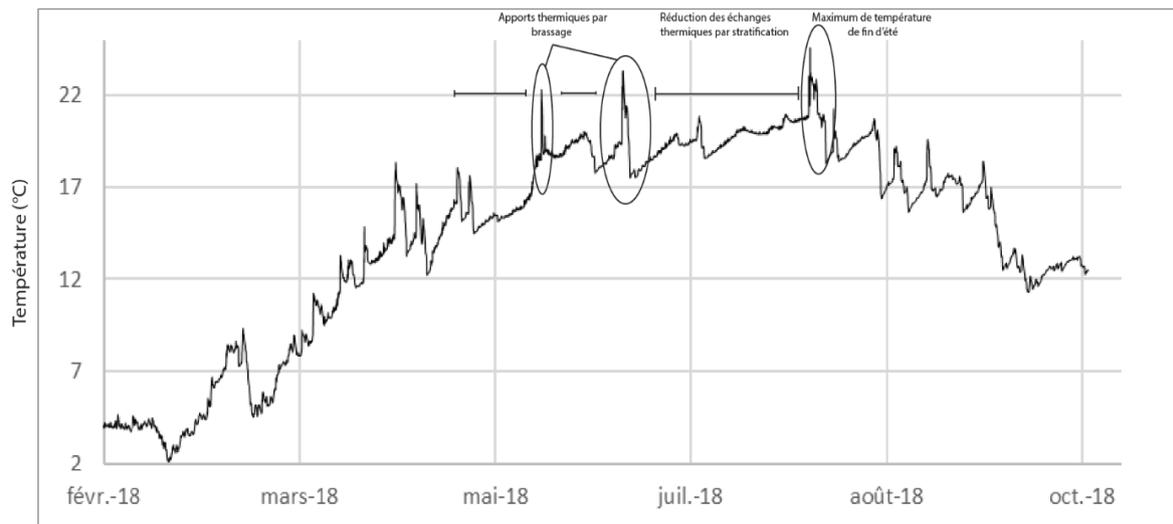


Figure 40: Evolution temporelle de la température à 2 m de profondeur, étang de Baerenthal

Lors d'étés avec la présence de nombreuses perturbations, les alternances de brassages rapides avec des stratifications courtes permettent à la couche de fond d'être fréquemment alimentée par les calories de surface et d'augmenter progressivement sa température. C'est à la fin de l'été que la couche de fond connaît ses plus fortes valeurs, liées à l'effet de la convection mécanique.

Dans l'intervalle des deux mois de stratifications estivales plurijournalières, la faible température de la couche de fond permet de réduire le bilan thermique de l'étang. Cependant, lors du brassage suivant la première forte stratification, la zone profonde va voir sa température augmenter rapidement, amenant à une augmentation de la contenance calorifique. La partie hypolimnique de l'étang, concernant plus ou moins le dernier mètre de profondeur pour les étangs peu profonds, représente un pourcentage assez élevé de la contenance calorifique total de la masse d'eau. En période de brassage, celui-ci se rapproche de 10% de la contenance calorifique, pour 5 % du volume de l'étang, tandis qu'il peut être réduit de moitié, et jusqu'à 5 %, lors des phases de stratification. Ces valeurs restent cependant loin des 30 à 40 % de la couche de surface mais qui représentent 30 % du volume de l'étang. Dans un rapport de poids, la couche de fond a une importance relative supérieure à celle de surface dans le bilan thermique stagnustre.

4.1.2.2 Le rôle des phases de brassage dans l'oxygénation des eaux de fond

Une stratification thermique provoque une répartition hétérogène de l'oxygène pouvant engendrer des zones anoxiques dans les profondeurs du plan d'eau. En lac, les écarts thermiques importants et durables entre la surface et le fond sont une problématique réelle pour l'oxygénation des eaux de fond (Hutchinson, 1957, Wetzel, 1983). En étang, les phases de stratification sont moins durables et les écarts de température moindres. Cette réduction de la durée et de l'intensité de la stratification laisse penser une réduction du risque d'anoxie dans les eaux de fonds, jusqu'alors peu étudié. A partir des données en continu à trois profondeurs sur une chaîne dans l'étang de Baerenthal, de premières analyses de l'évolution de l'oxygène dissous peuvent être établies.

L'évolution de l'oxygène dissous d'un étang

Les concentrations en oxygène dissous (OD) à la surface, 1 m et 2 m de profondeur évoluent différemment durant la période estivale, de fin juin à début septembre. Les teneurs moyennes oscillent entre 6 et 16 mg/L sur l'étang de Baerenthal.

En surface, la concentration en OD est au maximum lors des phases de stratification thermiques. Lorsque l'étang est en homothermie, celles-ci diminuent vers des valeurs de 4 à 8 mg/L. Les alternances plus rapides et fréquentes de stratification et brassage de fin d'été réduisent les valeurs de l'OD en surface, oscillant entre 6 et 12 mg/L. A la mi-septembre, les valeurs de surface chutent brusquement jusqu'à 0 mg/L pendant 10 jours, du 22 septembre au 2 octobre 2018, avant de remonter à des valeurs proches de 8 mg/L à la mi-octobre.

Les courbes des valeurs d'OD à 1 m et à 2 m de profondeur suivent une courbe similaire, inverse de celle des eaux de surface. Dès lors que l'étang est en stratification thermique, les données d'OD des couches profondes atteignent les 0 mg/L. Les phases de brassage permettent d'apporter l'oxygène vers les profondeurs, limitant les périodes d'anoxie. Les eaux à environ 2 m de profondeur représentatives des couches profondes de l'étang, ont été en situation d'anoxie avec des valeurs d'OD à 0 mg/L pendant 22 % du temps du 19 juin au 24 octobre 2018. L'état d'anoxie se fait plus rare à 1 m de profondeur mais reste présent pendant 9% du temps sur la même période d'étude. La teneur moyenne est de respectivement 4,5 mg/l et 3,7 mg/L à 1 et 2 m de profondeur. Lors des stratifications thermiques, les teneurs en OD à 2 m chutent rapidement à 0 tandis qu'il faut une

stratification longue et forte pour que ces valeurs atteignent 0 à 1 m de profondeur. Seules les périodes du 24 juillet au 1^{er} août, du 4 au 8 août et du 21 au 23 août 2018 ont été marquées par une anoxie à 1m de profondeur. Dans les couches les plus profondes, une longue phase d'anoxie a été mesurée du 15 juillet au 09 août 2018. Durant cette longue période, aucun apport d'oxygène n'a été mesuré sur la strate d'eau à environ 2 m de profondeur. Pour les strates à partir d'un mètre de profondeur et jusqu'au fond, la journée du 25 août a créé une modification importante de la structure chimique de la colonne d'eau. Cette période illustre la fin des fortes stratifications estivales et le début des phases de brassage plus fréquents et de faibles stratifications durant les mois de septembre et début octobre. A partir de cette date et de ce brassage complet de la colonne d'eau, les teneurs en oxygène des couches en dessous d'un mètre de profondeur seront toujours supérieures à 2 mg/L. Aucune phase d'anoxie de fond ne sera mesurée à partir de la fin du mois d'août (Figure 41).

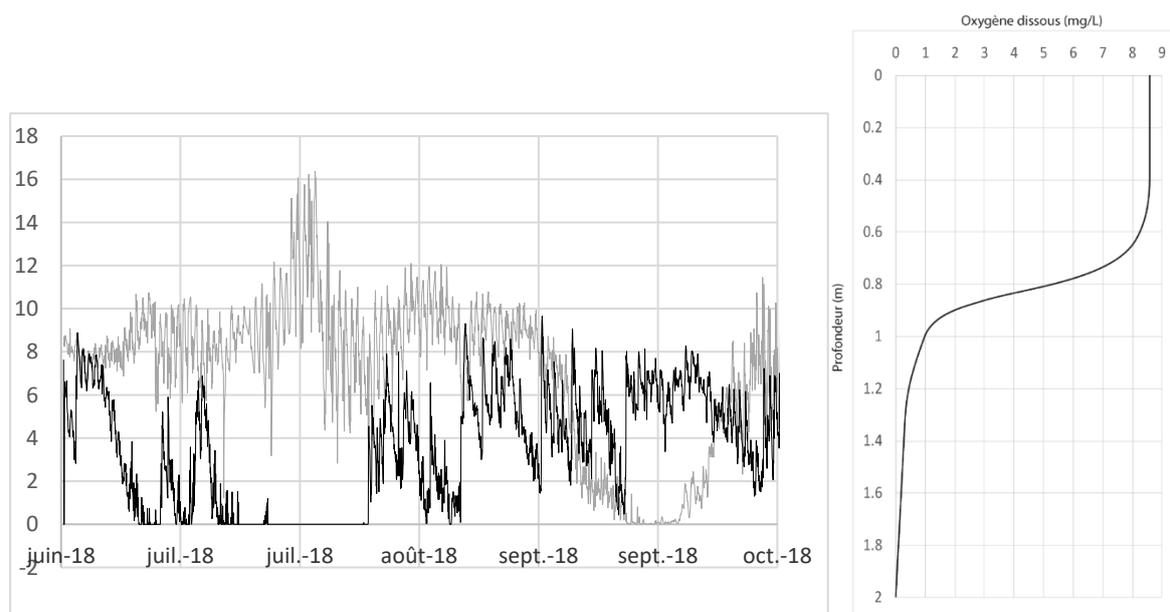


Figure 41: teneurs en oxygène dissous de surface (gris) et à 2m de profondeur (noir). A droite, teneurs en oxygène dissous dans la colonne d'eau de l'étang de Baerenthal en phase de stratification thermique (le 17/07/2018 à 17h).

A l'image des mesures effectuées sur plusieurs mois en continu au sein de l'étang de Baerenthal, les alternances de brassage et de stratification, typique des plans d'eau polymictiques, façonnent la structure thermique et la répartition d'oxygène de la colonne d'eau. La mise en place d'une stratification thermique engendre des taux d'OD très faibles dans les eaux de fond tandis qu'ils atteignent des maxima à la surface. Une fois la stratification établie, le taux d'OD diminue jusqu'à atteindre une valeur nulle après environ 2

à 3 jours sur la période mesurée. Les stratifications thermiques journalières ou réduites à quelques heures ne suffisent pas pour avoir des conditions anoxiques dans les couches inférieures. Les stratifications courtes, sur 2 ou 3 jours, font diminuer le taux d'OD des couches de fond sans toutefois permettre son anoxie avant une réoxygénation par brassage. Lors des brassages, les taux d'OD de fond augmentent brusquement et instantanément.

L'état de la concentration d'oxygène de nos étangs

Dans le respect du cadre de la DCE et dans l'optique d'une amélioration de la qualité de l'eau des plans d'eau, les mesures en oxygène dissous sont classées en 5 catégories ou classes de couleurs d'états médiocres à très bon ³⁰. Sur l'étang de Baerenthal, la moyenne d'oxygène dissous sur toute la colonne d'eau est de 5,1 mg/L sur la période de mi-juin à mi-octobre 2018, ce qui correspond à un « qualité moyenne ». A la surface de l'étang, la moyenne augmente jusqu'à 7,1 mg/L et correspond à un « bonne qualité ». En revanche, pour les eaux de fond, la qualité de l'eau est déclassée en « mauvaise qualité » avec une moyenne d'oxygène dissous de 3,7 mg/L. Sur la moyenne des trois profondeurs de mesures, à la surface, à 1 m et à 2m de profondeur, l'étang est globalement classé en qualité moyenne, sur 41,9 % du temps (Figure 42). La bonne qualité (21 %) et la mauvaise qualité (20,3 %) correspondent à environ 20 % du temps, tandis que la très bonne qualité (7,75 %) et la qualité médiocre (9,2 %) représentent moins de 10% du temps. Il est important de noter que ces mesures ont été effectuées sur la période de plus fortes stratifications thermiques propices à une faible teneur en oxygène dissous des eaux de fonds. Les périodes de brassages sont plus propices à la bonne qualité des eaux en oxygène dissous et sont ici peu représentées sur la période d'échantillonnage. Les valeurs d'octobre à mai ne devraient pas poser de soucis d'oxygénation des eaux, sauf lors d'événements exceptionnels.

³⁰Grilles d'évaluation de la qualité de l'eau SEQ-EAU- MEDD & Agences de l'eau, 2003

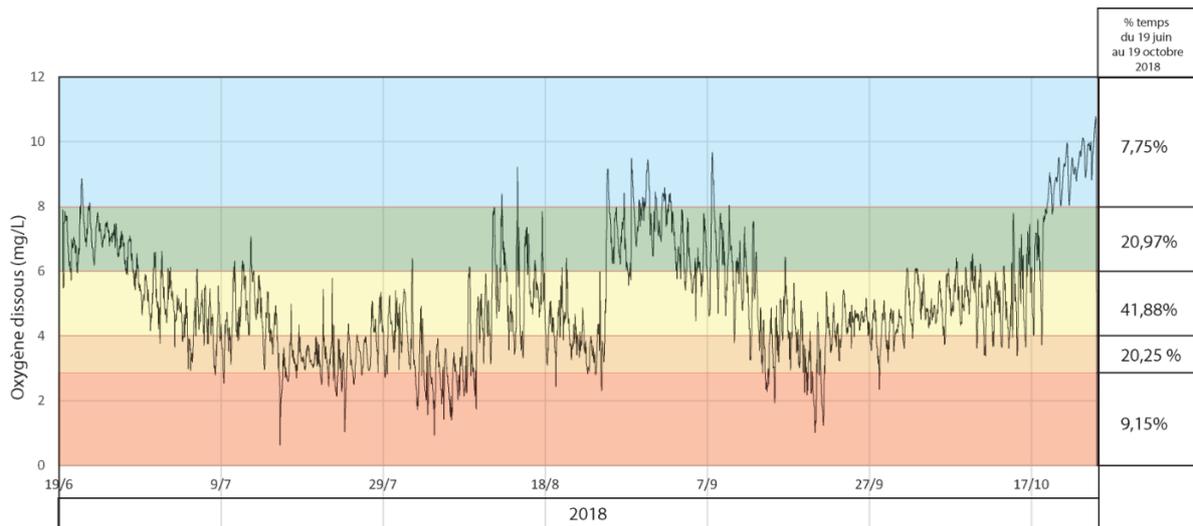


Figure 42: Evolution temporelle de la moyenne de l'oxygène dissous sur la colonne d'eau de l'étang de Baerenthal.

En moyenne, la teneur en oxygène de la colonne d'eau de l'étang étudié est plutôt de mauvaise à médiocre durant la période estivale, dû à la faible teneur des zones profondes, tandis qu'elle est bonne à très bonne globalement à partir de la fin de l'été et de l'automne. Les disparités sont fortes entre les parties superficielles et celles profondes de l'étang. Dès le premier mètre, les taux d'oxygène sont très bas tandis qu'ils atteignent des valeurs supérieures à 10 mg/l à la surface. Dans une optique d'amélioration de la qualité physico-chimique de l'eau en aval, la présence d'un déversoir en été permet une bonne oxygénation de l'émissaire. Inversement, une eau de fond soutirée dans le cours d'eau peut entraîner des taux d'oxygène très bas allant même jusqu'à l'anoxie sur des périodes de plusieurs jours. Par le déversement d'une eau de surface, l'étang apporte une réoxygénation du cours d'eau durant la période estivale. Son rôle peut alors être bénéfique dans certaines situations sur des cours d'eau à faible pente ou à écoulement temporaires, souvent faiblement oxygénés (Touchart *et al.*, 2012, Touchart, 2019³¹).

Malgré la présence de stratifications thermiques courtes et faibles comparées aux lacs, les étangs développent une répartition hétérogène de l'oxygène dans la colonne d'eau, pouvant amener à des anoxies rapides des couches profondes. La partie supérieure bénéficie de fortes températures et de la photosynthèse pour des valeurs d'oxygène dissous très

³¹L'effet des étangs de Chaillac (Moulin et Rochegaudon) sur la qualité de l'eau de l'Allemette : l'exemple de l'oxygène dissous.

élevées, tandis que les couches profondes connaissent une certaine anoxie, dès lors qu'une stratification thermique estivale est constatée dans l'étang.

4.2 Etude comparée de la dynamique thermique de trois étangs français à morphologies variées

L'analyse de l'étang comme modèle de fonctionnement montre que l'évolution thermique de ce milieu diffère de celui des lacs. Les étangs sont situés dans la limite basse des lacs dans les profondeurs réduites à quelques mètres au maximum. Dans cette zone, la variation de quelques centimètres seulement peut amener à des écarts importants dans les dynamiques thermiques. Étudier l'étang comme un seul et même objet nous donne des informations fondamentales à la compréhension du milieu mais il serait réducteur de ne pas entrer davantage dans le détail et dissocier les pièces d'eau étudiées en au moins deux types d'étangs : ceux profonds et ceux peu profonds.

4.2.1 Une évolution de la contenance calorifique des trois étangs étudiés

Par sa faible profondeur, l'étang se réchauffe et se refroidit plus vite qu'un autre plan d'eau (Brunaud, 2006) car c'est par la surface qu'un plan d'eau gagne ou perd de la chaleur qui est ensuite distribuée dans toute la masse d'eau, dépendant du volume (Delebecque, 1896). La profondeur du plan d'eau a une grande importance notamment dès les premiers mètres. Plus le plan d'eau a une profondeur importante, plus il est dépendant des échanges de chaleur par radiation solaire et l'action du vent (Goldman & Horne, 1983) et dépend peu des échanges convectifs (Ragotzkie, 1978). Pour les étangs, existe-t-il une différenciation à l'intérieur des quelques mètres de profondeur au maximum ?

Sur les trois années d'études, la contenance calorifique maximale instantanée des étangs étudiés est détenue par le petit étang de Rilhac, avec 4 608 cal/cm² le 6 août 2018. Le maximum de l'étang de la Ramade a été constaté le 4 août de la même année, avec une valeur de 3 528 cal/cm². Pour l'étang de Baerenthal, sa valeur maximale calorifique de 3 176 cal/cm² a été également mesurée le 4 août 2018. Pour l'étang de la Ramade, seul le 22 juin de l'année 2017 contenait plus de calories avec 3 595 cal/cm². Les minima calorifiques surviennent durant la période hivernale, généralement en janvier ou février avec 78 cal/cm² le 3 décembre 2017 pour l'étang de la Ramade, soit la valeur la plus basse mesurée. C'est

quelques mois plus tard, le 26 février 2018 que l'étang mosellan de Baerenthal a atteint son minimum calorifique de 144 cal/cm². Lors de ces deux périodes citées, les étangs étudiés sont en stratification inverse avec prise en glace. Seul l'étang de Rilhac n'a pas été englacé, avec un minimum élevé à 724 cal/cm² le 28 février 2018 (Figure 43).

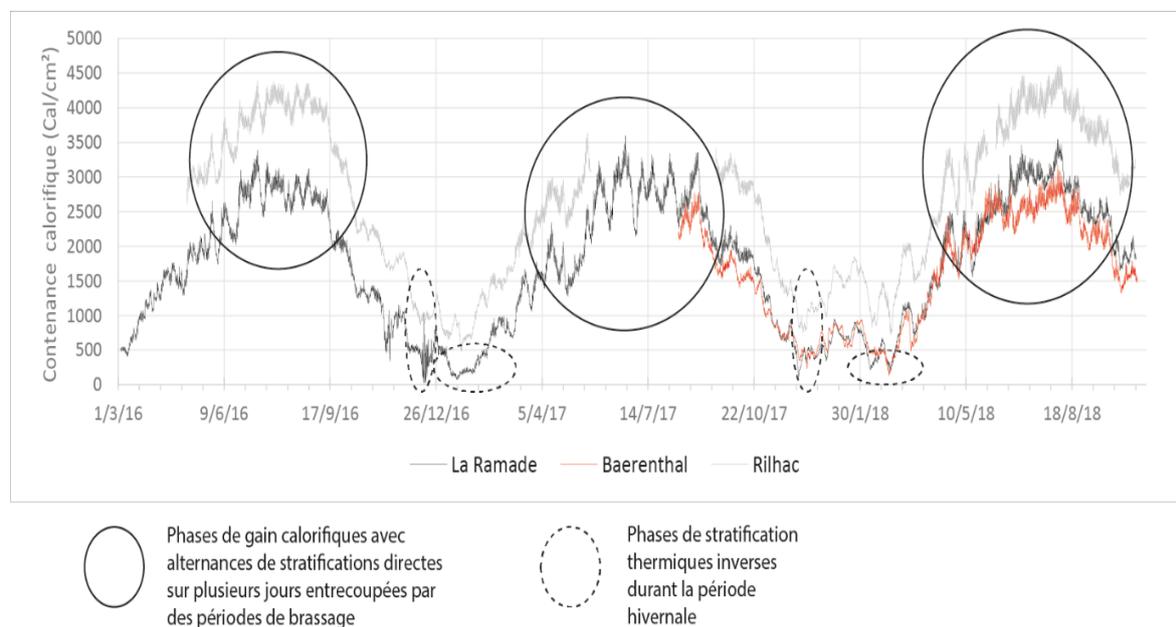


Figure 43: Evolution temporelle de la contenance calorifique des étangs de Rilhac (gris), la Ramade (noir) et Baerenthal (rouge)

L'étude des trois étangs met en avant pour chacun une évolution de la contenance calorifique de type étang. Cependant, des écarts conséquents peuvent être mesurés entre les trois étangs, liés à des écarts de profondeur maximale. Tout comme la colonne d'eau de l'étang ne suit pas celle de la partie supérieure du lac, il a été choisi de dissocier les étangs profonds de ceux peu profonds, dont le fonctionnement thermique diffère également. Cette approche suit la logique de dissociation entre les étangs-lacs, les étangs et les mares-étangs. Ici, seuls ceux que l'on peut considérer comme étang-lac (Rilhac) et étangs (Ramade et Baerenthal) seront étudiés, classés comme des étangs profonds pour le premier et peu profonds pour les deux autres.

4.2.2 Analyse du bilan thermique d'étangs peu profonds

Nous considérons ici les étangs peu profonds comme les étangs dont la profondeur moyenne est proche de celle de la moyenne française, à savoir entre 0,8 et 1,5 m environ (Bartout, 2006). Ces étangs sont les plus répandus sur notre territoire et méritent une attention particulière du fait de la quasi absence d'études sur leur fonctionnement.

2.2.4.6 Evolution temporelle de la dynamique thermique d'étang peu profond

La dynamique annuelle d'un étang peu profond est caractérisée par des périodes courtes de stratification directes en été et inverses en hiver, et dominé par une homothermie le reste du temps. Au printemps, le plan d'eau connaît des stratifications thermiques journalières, régulièrement détruites par la fraîcheur nocturne. Les alternances de stratifications journalières et de brassages tous les deux à trois jours permettent une accumulation de chaleur dans toute la colonne d'eau. Durant cette période, la stabilité est faible et dépasse occasionnellement les 1 J/m^2 de moyenne sur la colonne d'eau. Autour du mois de juin, les stratifications thermiques deviennent de plus en plus longues, atteignant les quatre à cinq jours de stabilité, avec des températures de surface dépassant les 20°C . La stabilité atteint son maximum généralement lors du maximum de radiation solaire directe, soit autour du 21 juin. La stabilité maximale avoisine les 5 J/m^2 et est en moyenne comprise en 1 et 3 durant l'été. Pendant la période estivale, la stratification thermique directe domine, entrecoupée par des phases de brassage de fréquence d'environ 7 à 10 jours. Cette fréquence correspond globalement à celle de l'arrivée de dépressions océaniques, notamment en Limousin (Touchart, 2016). La dispersion de chaleur de surface s'effectue sur les premiers centimètres jusqu'à 1 m de profondeur, voire 1,5 m lors de vent plus fort. Lorsque le vent est suffisamment fort et permanent, il brasse la totalité de la colonne d'eau. La couche superficielle du premier mètre est fortement réchauffée, dépassant fréquemment la moyenne de 25°C sur son ensemble. Sur les premiers centimètres, la fine couche pelliculaire de surface dépasse occasionnellement les 30°C . Tout au long de l'été, l'alternance de stratification et de brassage apporte de l'énergie calorifique aux couches de fond. Cette couche profonde a une température qui augmente progressivement au cours de l'été, ou plus brutalement lors de forts vents, amenant à une homothermie. A la fin de l'été, la dispersion des calories vers le fond élève la température de la couche profonde, dont cette dernière peut dépasser les 20°C régulièrement. De fait, les stratifications thermiques de fin août à septembre sont plus courtes, le refroidissement nocturne des couches de surface et la baisse des températures atmosphériques provoquent une jonction rapide des couches de surface et de fond. L'homothermie automnale a lieu dès le mois d'octobre, en lien avec la concomitance de l'augmentation de la température de fond par dispersion des calories, ainsi que de la diminution de la température de surface liée à la baisse des températures atmosphériques. Durant l'automne, l'étang est en homothermie à environ 15°C de moyenne,

avant de descendre à 4 °C ou 5 °C au début de l’hiver. Durant l’hiver, les étangs peu profonds connaissent des stratifications thermiques inverses fréquentes et parfois durables. Sur plusieurs jours, il peut se développer au sein de l’étang une stratification inverse pendant les périodes les plus froides. La couche de surface est alors à une température inférieure à celle de densité maximale à 4°C, avec parfois une prise en glace légère (Figure 44).

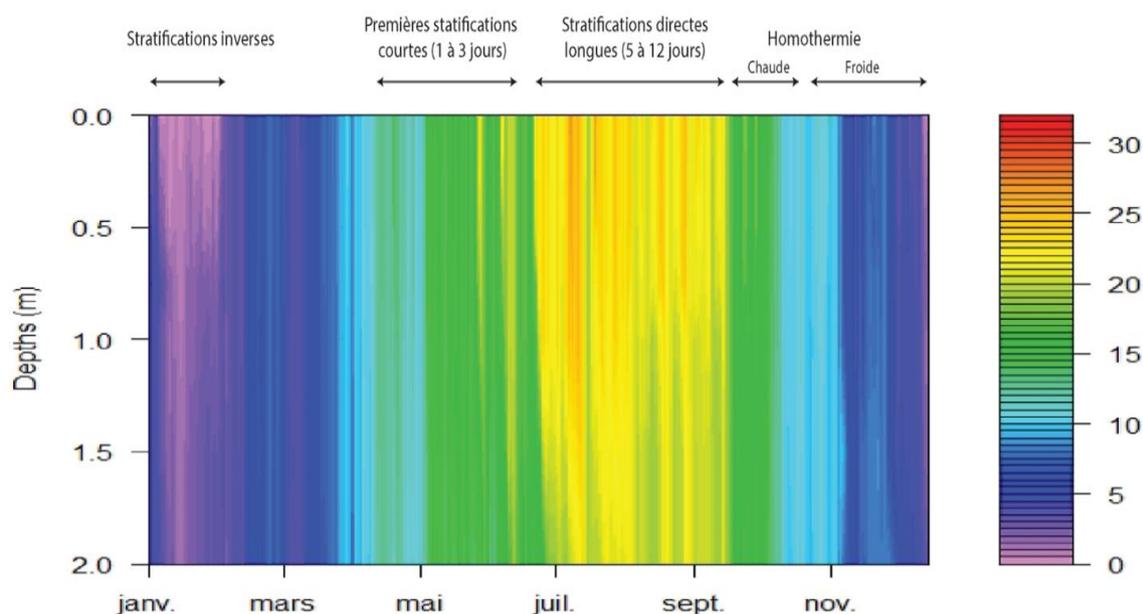


Figure 44: Evolution annuelle de la température en trois dimensions d'un étang peu profond. Etang de la Ramade, 2017. Q. Choffel, 2018

2.2.4.7 Evolution du bilan thermique d'étang peu profond

La période printanière connaît des évolutions rapides et conséquentes du bilan thermique lors des phases de stratification thermiques courtes. Lors de ces périodes, la stratification thermique engendre un gain important, rapidement réduit par un brassage de la colonne d'eau. Lors de l'été, la contenance calorifique maximale dépasse rarement les 3 500 cal/cm² et oscille globalement entre 2 000 cal/cm² lors d'homothermie et 3 000 cal/cm² aux pics de stratification thermique (Figure 45). La faible profondeur de ces plans d'eau ne leur permet pas de stocker des calories dans les couches de fond. De fait, lors de phases de brassages successifs à une stratification estivale, la contenance calorifique chute fortement car l'ensemble de la colonne d'eau est refroidi par la convection libre et forcée. Les phases de gains et de pertes alternent donc durant l'été en fonction de la structure de l'étang et des conditions météorologiques. Chaque dépression cause une chute des calories vers un seuil plancher autour des 2 000 cal/cm². Les brassages courts font chuter de quelques

dizaines de calories jusqu'à plusieurs centaines lorsqu'ils durent plus longtemps et touchent toute la colonne d'eau.

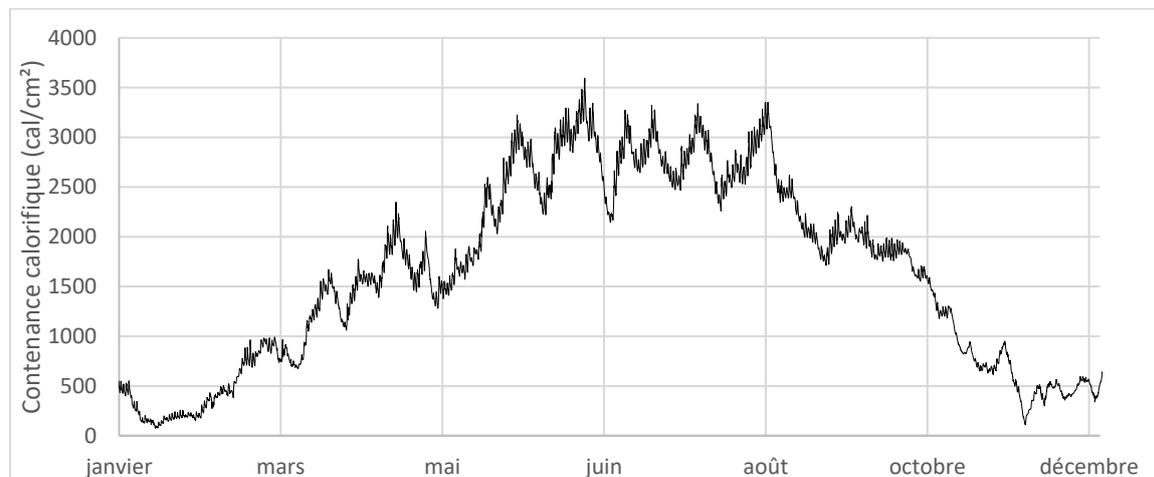


Figure 45: Evolution de la contenance calorifique d'un étang peu profond

Le refroidissement automnal est rapide, tout comme l'a été le réchauffement printanier. L'homothermie du plan d'eau limite ses gains calorifiques dominés par un refroidissement convectif amenant à une homothermie à 4°C durant l'hiver et à de régulières stratifications thermiques inverses. L'homothermie à 4°C, caractérisée par une contenance calorifique de 500 cal/cm² est atteinte au mois de décembre. L'étang se refroidit régulièrement en dessous de la limite des 500 cal/cm² provoquant des stratifications inverses. Si l'étang est très peu profond, des homothermies proches de 0°C peuvent être mesurées, amenant à une contenance calorifique stagnustre quasi nulle.

2.2.4.8 Analyse du bilan thermique des journées exceptionnelles

Exemple de la journée du 4 août 2018 : maximum calorifique pour les étangs peu profonds avec une structure thermique différente

La journée du 4 août 2018 a été exceptionnelle sur le plan météorologique puisqu'elle a été la plus chaude dans le secteur de l'étang de Baerenthal avec une température de l'air de 34,8 °C mesurée à 15h à la station MétéoFrance de Dambach, à 9 km de l'étang, avec un vent léger et soutenu d'orientation nord-nord-est à 3,3 m/s sur la moyenne de la journée. Plus à l'ouest, sur le plateau de la Courtine, à proximité immédiate de l'étang de la Ramade, c'est à la fin du mois d'août que ces maximales seront atteintes. Le maximum enregistré pour cette région est de 30,8 °C à 15h, avec un vent de nord soufflant à 2,4 m/s en moyenne. Les conditions météorologiques aux droits des deux étangs peu profonds étudiés sont comparables, avec un temps anticyclonique estival et des températures de l'air élevées,

jusqu'à très élevées pour Baerenthal. Ce temps anticyclonique chaud, installé depuis le 2 août 2018, atteint son maximum au 4 août dans le nord-est de la France, et le 6 août en Limousin. Face à ces conditions atmosphériques caractéristiques des journées d'été ensoleillées mais se rapprochant d'un maximum de température de l'air, le bilan thermique des deux étangs a atteint un maximum ce 4 août sur l'année 2018. Cependant, nous verrons que la structure thermique des deux étangs est très différente sur cette journée.

Il se pourrait que cette accumulation de chaleur ne soit pas uniquement climatique mais plutôt liée à la dynamique interne de l'étang, principalement pour l'étang de la Ramade. Pour celui de Baerenthal, il semble que la cause principale de ce pic calorifique soit l'atteinte du maximum de température de l'air. Cette hypothèse se retrouve dans la valeur maximale de température de surface, atteinte également le 4 août 2018 avec 30,9°C sur l'étang de Baerenthal. Dans cet étang, la thermocline se situe entre 0,75 m et 1 m de profondeur. Cette thermocline est très marquée, située assez haut dans le centre de gravité de la colonne d'eau. L'épistagnion, d'une épaisseur de 75 cm est à une moyenne de 29,7°C, tandis que l'hypostagnion est quant à lui 8,3 °C inférieur, à une moyenne de 21,4 °C à 17h (Figure 46).

Pour l'étang de la Ramade, le maximum calorifique a été atteint sans lien avec un maximum de température de l'air, mesuré plus tard dans la période estivale. La journée du 4 août, le maximum de température de l'eau sur l'étang a été mesuré à 29°C à la surface. Le profil thermique de l'étang est différent de celui de Baerenthal, avec une thermocline faiblement marquée et profonde, aux alentours d'1,7m. L'épistagnion de l'étang de la Ramade a une moyenne de 27,8 °C sur les 150 premiers centimètres, avec un hypostagnion réduit à une épaisseur de seulement 50 cm, d'une température moyenne de 24,4 °C ce jour-là à 20h. Le maximum calorifique est arrivé tardivement pour l'étang de la Ramade, en fin de journée (20h) et confirme l'hypothèse de l'influence de la convection mécanique sur la structure thermique et la répartition de chaleur vers les couches profondes. A l'inverse de l'étang de Baerenthal, où la forte température de l'air a surchauffé les premiers cm d'eau sans affecter la partie profonde, le profil de l'étang de la Ramade montre une colonne d'eau entièrement réchauffée par l'effet du vent du nord dont le fetch est important dans la partie centrale et sud de l'étang. L'action du vent au-dessus de la Ramade entraîne une diffusion de la chaleur vers les couches de fond. La température à 2m de profondeur est d'environ 4°C plus chaude que celle de l'étang mosellan. La thermocline faible montre bien une diffusion

par le vent de l'ensemble des calories de surface vers le fond. L'étang est proche de l'homothermie, alors que seule la couche de fond résiste et n'atteint pas des températures proches des 27°C sur le reste de la colonne d'eau.

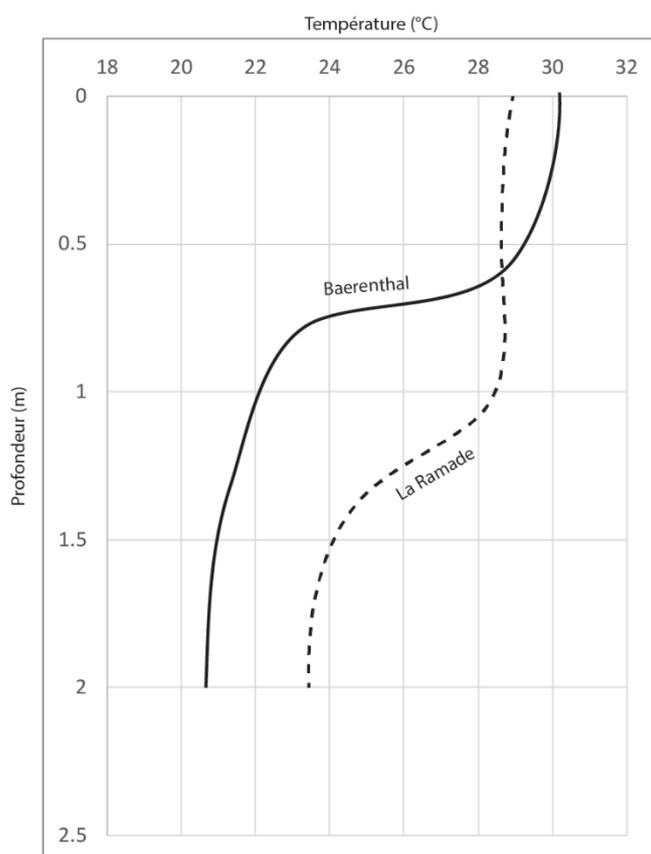


Figure 46: Structure thermique des étangs de la Ramade (pointillé) et de Baerenthal (noir) lors de leur maximum calorifique de l'année 2018, le 4 août à 17h.

Sur cette journée du 4 août 2018, les deux étangs peu profonds ont atteint leur maximum calorifique de l'année, malgré des conditions météorologiques différentes. Les deux réponses différentes aux forçages externes montrent la particularité de ces milieux, parfois capables de se stratifier fortement, parfois capables d'emmagasiner de la chaleur sur l'ensemble de leur colonne d'eau pour donner un résultat similaire de contenance calorifique élevée.

Le bilan thermique d'un étang peu profond est caractérisé par son amplitude forte à la fois saisonnière et journalière. Fortement soumis aux variations climatiques, il subit plusieurs brassages, environ tous les 10 jours, lors de la période estivale. L'accumulation de chaleur atteint régulièrement toute sa colonne d'eau, créant des homothermies chaudes régulières, notamment à la fin de l'été. Les faibles profondeurs de ces étangs ne permettent

pas une stabilité forte sur le long terme. Ils développent cependant une capacité ponctuelle à se stratifier et à créer un gradient thermique important malgré leur faible profondeur.

4.2.3 Analyse du bilan thermique d'étang profond

L'étang de Rilhac, avec ses 4,2 m de profondeur maximale pour 0,4 ha, est à la limite morphologique entre l'étang et le lac. L'analyse de cet étang est représentative des étangs profonds, de plus de 1,5 m de profondeur moyenne ou de 4 m de profondeur maximale environ, caractérisés par une profondeur relative élevée, limitant ou augmentant l'action du vent sur la surface en eau. Pour rappel, dans le cas de l'étang de Rilhac, la profondeur relative a une valeur de 5,95 %.

2.2.4.9 Analyse de l'évolution temporelle de la dynamique thermique d'un étang profond

L'étang profond est stratifié au début du printemps, avec des alternances de stratification et de brassage dès les mois d'avril et mai. La longueur de la stratification varie de quelques jours à quelques semaines au maximum, lors de phases de chaleur printanières. La faiblesse de la stratification thermique en cette période permet au vent d'apporter de l'énergie aux couches du fond suite à l'alternance de stratification et de brassage printanier. La couche hypostagnique, concernant les strates localisées entre 2 et 4 m de profondeur environ, passe de 12°C au début du printemps à 17°C environ au début de l'été. Elle conservera cette température jusqu'au mois d'octobre, avant de diminuer à nouveau. Les premières fortes stratifications printanières et la température à cette période déterminent la température de fond qui sera ensuite isolée par la thermocline estivale et l'absence ou la rareté des brassages complets. La stratification durable, semblable à celle retrouvée en lac peu profond, s'établit au début du mois de juin et restera en place jusqu'à la fin du mois de septembre, soit pendant environ 4 mois. Seules les fortes dépressions océaniques peuvent brasser une partie du plan d'eau mais la totalité de la colonne d'eau n'est que très rarement affectée durant cette période³². Il ne s'opère pas de mélange des eaux de surfaces et de fond, la couche à partir de 2 m de profondeur est isolée et ne bénéficie pas des caractères physico-chimiques de la couche de surface, dont notamment l'apport d'oxygène dissous nécessaire au développement de la vie aquatique. A partir de fin août/début septembre la thermocline

³²Nous restons dans l'hypothèse car nous n'avons qu'un seul étang profond étudié. Cependant, sur les années 2016 et 2018 l'étang de Rilhac n'a jamais été brassé sur la totalité de sa colonne d'eau.

s'affaiblit et plusieurs brassages touchent une grande partie de la colonne d'eau. Les stratifications deviennent plus éphémères. Le raccourcissement de la durée de radiation solaire, éloignée du solstice d'été, ainsi que le refroidissement nocturne entraînent un brassage de la masse d'eau par convection libre. Les couches de surface se refroidissent et, devenant plus denses, elles plongent vers le fond et sont remplacées par les couches intermédiaires qui elles-mêmes seront refroidies et amenées vers les profondeurs. Ce processus lent de convection entraîne progressivement le refroidissement de la partie supérieure du plan d'eau jusqu'au brassage complet de la colonne d'eau, survenant au mois d'octobre pour les étangs profonds. Durant l'hiver, les températures oscillent entre 4 °C et 10 °C (Figure 47). Des températures inférieures à 4°C en surface, générant une stratification inverse, sont assez rares sous climat océanique pour les plans d'eau profonds. Sur l'étang de Rilhac, aucune stratification inverse n'a été mesurée lors de la période d'étude.

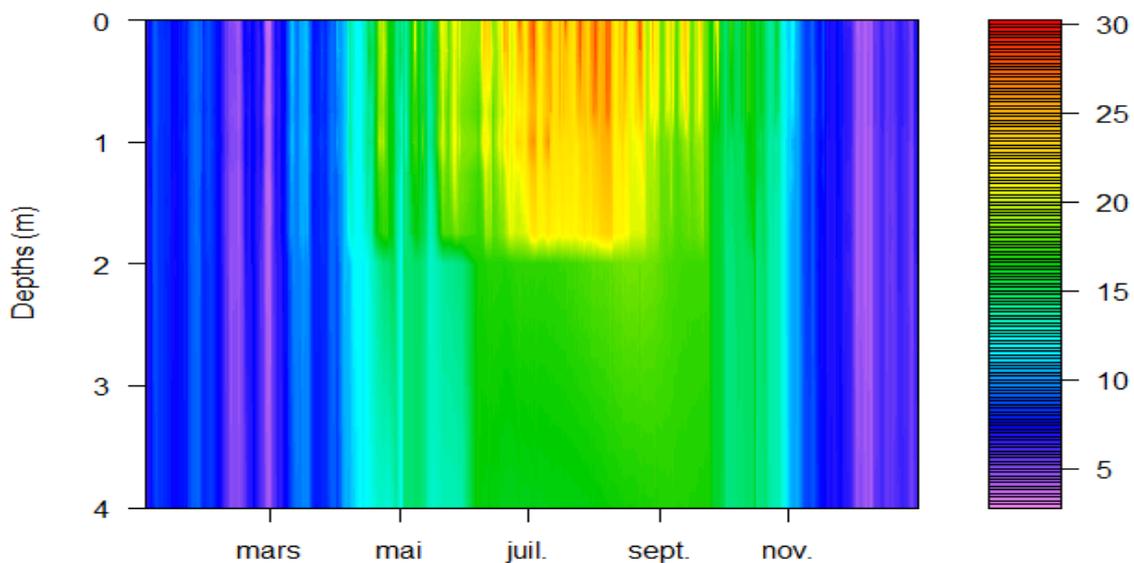


Figure 47: Graphique tri-dimensionnel de la structure thermique d'un étang profond sur une année. Etang de Rilhac, 2017. Q. Choffel, 2018

L'étang profond possède des tendances caractéristiques à la fois de l'étang et du lac. Par sa réponse rapide aux conditions atmosphériques et ses stratifications éphémères printanières, il se rapproche du fonctionnement de l'étang en tant que tel. Sa capacité à se

stratifier de manière durable, sans être brassé sur l'ensemble de sa colonne d'eau est une caractéristique lacustre.

Les écarts thermiques entre la surface et le fond entraînent une stabilité de l'étang profond élevée, se rapprochant de celle retrouvée dans les lacs peu profonds (Allot, 1986), dépassant les 15 J/m² en certaines périodes. L'étang-lac est alors à la limite de la dimicticité et son caractère polymictique peut être questionné.

2.2.4.10 Analyse du bilan thermique d'étang profond

Le bilan thermique d'étangs profonds est influencé par les phases de stratification et de brassages successifs printaniers dès la fin de l'hiver. Lors de phases de stratification thermique, l'étang gagne de nombreuses calories. Les brassages font perdre des calories de façon plus lente, en lien avec la diffusion de chaleur en profondeur. Le bilan thermique dépasse les 4 000 à 4 500 cal/cm² (Figure 48). Lors de la période estivale, au maximum calorifique, la contenance calorifique varie peu, légèrement influencée par l'accumulation de chaleur dans les couches superficielles. La phase de gain de calories durant le printemps et le début de l'été est rapide, avant de stagner lors du maximum estival, puis de diminuer de façon lente durant la fin de l'été et le début de l'automne. Cette phase se dissocie de celle des étangs peu profonds où les amplitudes de la contenance calorifique estivale sont fortes. Les brassages de la fin de l'été affectent une profondeur de plus en plus importante de la colonne d'eau allant jusqu'au brassage complet automnal. Lors de cette phase, les couches les plus profondes reçoivent les calories nécessaires à leur réchauffement. La chaleur stockée en profondeur est restituée progressivement à l'ensemble de la masse d'eau et lui permet d'avoir une inertie thermique plus conséquente que les étangs peu profonds sur la période automnale. De fait, durant la période hivernale, le bilan thermique d'étangs profonds descend rarement en dessous des 500 cal/cm², synonyme de stratification inverse. Sous nos latitudes et en climat océanique, la restitution de la chaleur de fond ne permet pas la mise en place d'une stratification thermique inverse, là où les étangs peu profonds peuvent être concernés (Figure 48).

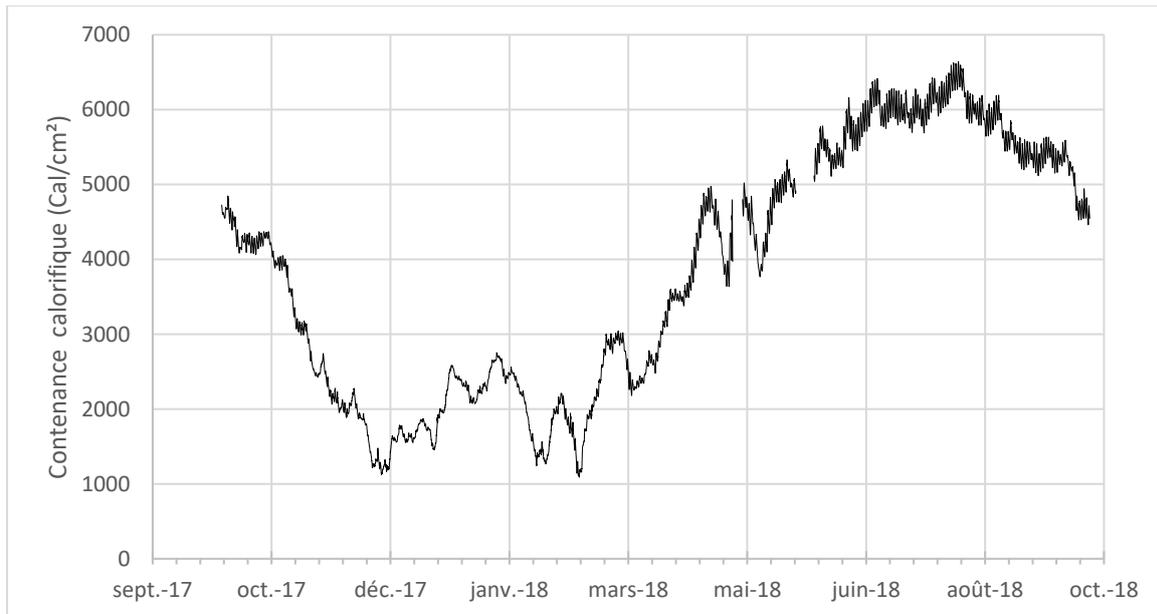


Figure 48: Evolution de la contenance calorifique d'un étang profond- Etang de Rilhac, 2018. Q. Choffel, 2018

Le fonctionnement thermique des étangs profonds a une temporalité plus longue que celle des étangs pelliculaires, faisant qu'elle se rapproche de celle des lacs. La forte stabilité de la colonne d'eau ne permet pas de brassages complets estivaux, seuls des brassages partiels apportent des calories dans les deux premiers mètres. Les amplitudes de bilans thermiques à la fois saisonniers et journaliers sont plus réduites que pour les étangs peu profonds. Ce type de fonctionnement thermique est à la limite entre l'étang et le lac, dans sa définition thermique et de micticité, avec des apports calorifiques conséquents dépassant les 4 000 cal/cm² et des phases de stratification sur plusieurs mois. Cependant, malgré la forte profondeur relative, les valeurs n'atteignent pas celles mesurées en lac. La couche de fond, bien qu'isolée, atteint des températures élevées, bien loin de celles de densité maximale de l'eau.

La profondeur est le déterminant majeur dans la dissociation des fonctionnements thermiques stagnustres et lacustres. Elle opère également à l'intérieur des systèmes stagnustres, où il semble y avoir un seuil de différenciation des étangs profonds et peu profonds. Ceux supérieurs à cette valeur seuil vont connaître des stratifications durables avec un isolement de la couche de fond des échanges avec la surface. Pour les moins profonds, les phases de brassage alimentent régulièrement les strates profondes pendant la période estivale. La couche de fond apporte une contenance calorifique proportionnellement plus

importante, notamment à la fin de l'été. Une dissociation aux alentours de 2 m de profondeur est visible suite à l'étude des trois étangs. Les premières hypothèses peuvent tendre vers une différenciation verticale des masses d'eau à partir de cette profondeur, en fonction de la superficie du milieu. Les étangs dont la profondeur maximale est inférieure à 2-3 m ont une dynamique thermique rapide, avec une alternance de stratification thermique et de brassages fréquente durant la période estivale. Pour les profondeurs supérieures à 2 à 3m, les étangs peuvent commencer à développer des stratifications plus solides et durables, allant même jusqu'à une période de plusieurs mois pour les plus profonds et dont la profondeur relative est forte.

La prise en compte de la seule profondeur ne suffit pas à délimiter précisément les fonctionnements thermiques pour ces milieux. Leur particularité réside dans la possibilité d'avoir un plan d'eau petit et profond, dont la profondeur relative ou l'indice de creux (Delebecque, 1898) apportent une information complémentaire à la capacité du plan d'eau à se stratifier. Sur les trois étangs étudiés, l'indice de creux est respectivement de 0,44, 0,75 et 6,72 pour les étangs de la Ramade, de Baerenthal et de Rilhac. D'après la classification établie par Meybeck (1995), classant les indices de creux moyens de lacs en 5 catégories de très plat à très creux, l'étang de la Ramade est dans la catégorie lac normal (0,5 à 2,5), lac creux pour celui de Baerenthal (2,5 à 12,5) et en lac très creux pour Rilhac (>12,5). La forte profondeur relative de l'étang de Rilhac en fait un étang creux, dont le fonctionnement se rapproche de celui des lacs, en limitant l'action de la convection mécanique sur les quelques mètres de la colonne d'eau par un fetch réduit. A l'inverse, dans les deux étangs dont les indices de creux sont inférieurs à 1, le fonctionnement est celui d'étangs pelliculaires, particulièrement éloigné de celui du modèle lacustre.

4.3 Éléments de comparaisons du bilan thermique entre les petits plans d'eau

Le bilan thermique d'un plan d'eau est un concept créé pour les lacs et adapté généralement aux plus grands d'entre eux. Les effets morphologiques, climatiques et géographiques affectent particulièrement l'évolution du bilan thermique. Bien que l'altitude modifie le bilan thermique, tout comme la latitude, il s'avère que les plus fortes corrélations dépendent des paramètres morphologiques, soit la profondeur et le volume du lac (Birge, 1915, Hutchinson, 1957, Gorham, 1964). Nous souhaitons ici comparer les données

calorifiques des étangs, à l'image de celles effectuées en lac (Birge, 1915, Gorham, 1964, Allot, 1986) et ainsi que le préconise Touchart dans un article sur le bilan thermique des étangs (2016). Des corrélations peuvent être effectuées entre la morphologie et le bilan thermique des étangs, étendus à quelques lacs peu profonds afin de cerner les limites hautes de dissociation entre étang et lac.

L'extension de l'étude de la corrélation entre la morphologie et le bilan thermique aux étangs permet d'ouvrir vers des milieux particuliers, comme les plans d'eau de barrage. Ces derniers apportent un intérêt supplémentaire à l'étude sur la restitution des calories dans l'émissaire. La connaissance de la quantité de calories rejetées dans le cours d'eau aval est un avantage pour lutter contre le risque thermique en cours d'eau.

4.3.1 Etablissement d'une extrapolation du bilan thermique à une région d'étangs

2.2.4.11 Le bilan thermique et la morphologie des étangs

L'œuvre de Birge en 1915 fut une des plus importantes pour la comparaison entre lacs à climats légèrement différents et situés sur deux continents opposés. Avec l'aide des données de Halbfass sur le continent européen, Birge estima que les lacs du vieux continent avaient un bilan thermique inférieur à celui des lacs des Etats-Unis d'Amérique. La corrélation a été cherchée au sein des profondeurs maximales et moyennes de chaque lac et la comparaison aborde également des paramètres physiques de la masse d'eau, tels que la largeur de l'épilimnion, dont la supériorité entraîne de plus grands bilans thermiques pour les lacs américains selon Birge (1915). Pour ce même auteur, d'autres facteurs tels que le climat, la position géographique et principalement, l'altitude, sont à l'origine des écarts dans les bilans thermiques mesurés. Malgré la complexité des facteurs influençant le bilan thermique, Birge réussit à créer des premières tendances et analyses du bilan thermique à une échelle mondiale. Il classa même les lacs en fonction de leur bilan thermique, dont les lacs de première classe qui ont un bilan thermique annuel compris entre 20 000 et 40 000 cal/cm². Les intérêts reposent avant tout sur la connaissance et l'influence de la structure thermique du plan d'eau. Cette composante sera plus ou moins oubliée par la suite, et notamment dans les corrélations de Gorham (1964).

Le chercheur de l'université du Minnesota, E. Gorham, est probablement celui qui s'est le plus penché sur les corrélations entre les facteurs influençant le bilan thermique des grands lacs. En analysant 71 lacs de la zone tempérée, E. Gorham a émis les premières tentatives de corrélation entre le bilan thermique et les caractéristiques morphologiques du plan d'eau (Gorham, 1964). Les premières analyses montrent une corrélation forte avec la profondeur moyenne. Ce lien est probablement dû à la capacité de stockage de chaleur plus importante lorsque la colonne d'eau est profonde. Le coefficient de corrélation trouvé entre ces deux éléments est de +0,77. Il est légèrement supérieur à la corrélation avec la superficie, prenant en calcul sa racine carrée, estimée à +0,74. La possible influence provient du fait que plus un lac est large, plus le vent est capable d'amener des calories en profondeur et donc d'avoir un épilimnion large. Cependant, ce facteur fonctionne pour les grands lacs, dont les superficies sont déjà importantes. Pour des lacs intermédiaires, des profondeurs relatives importantes perturbent ces corrélations. Le volume, produit du bilan thermique, connaît logiquement une forte corrélation avec celui-ci. Toujours d'après l'étude de E. Gorham, la comparaison avec la racine cubique du volume donne le résultat le plus satisfaisant (Figure 49).

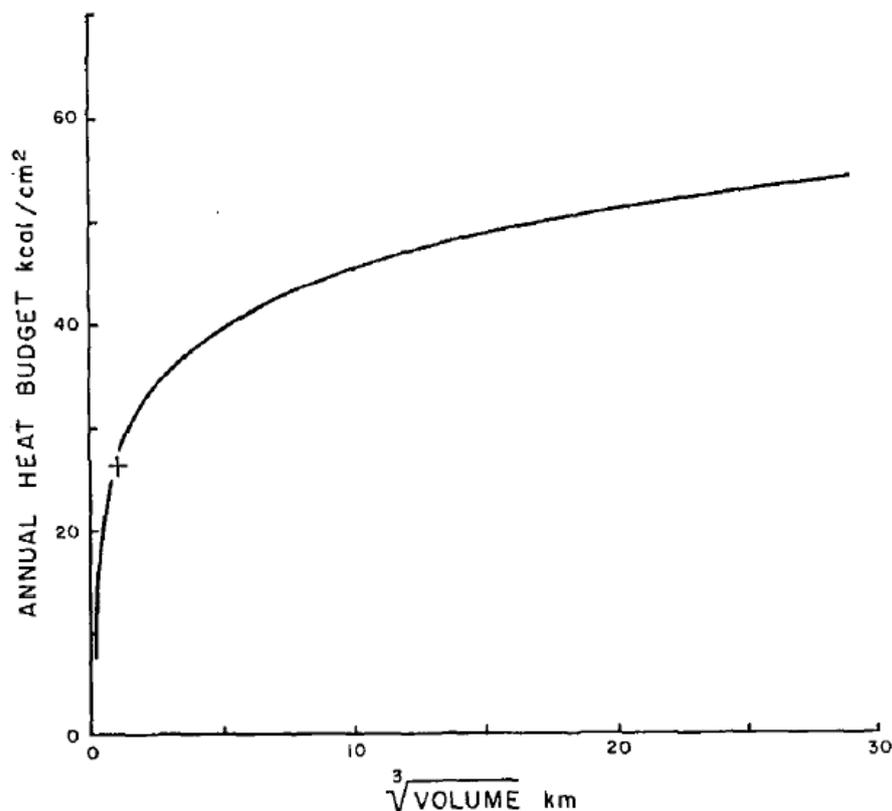


Figure 49: Corrélation entre la racine cubique du volume et le bilan thermique. Gorham, 1964

E. Gorham propose une première équation de calcul du bilan thermique à partir du volume des lacs. La formule est la suivante :

$$(6) \quad BT = 18.8 \log_{10} \sqrt[3]{V} - 29,7 \quad \text{Avec, } V : \text{volume du lac (m}^3\text{)}$$

Il est alors possible de déterminer le bilan thermique approximatif d'une région de lacs, d'un pays ou d'un continent, à condition de connaître le volume des plans d'eau. Cette équation développée par Gorham s'adapte parfaitement aux grands lacs, mais semble moins applicable pour répondre à un besoin de connaissance sur les plus petits plans d'eau. Le calcul à partir du volume donne des valeurs négatives de bilan thermique à partir d'un volume d'eau d'environ 55 000 m³ et s'annule pour des plans d'eau dont la profondeur moyenne est inférieure à 1,3m (Touchart, 2016). La grande majorité des étangs ne peuvent pas être intégrés dans ces équations issues de calculs sur les grands lacs.

En Limousin, d'après les calculs de Touchart et Bartout (2015), le volume moyen de tous les plans d'eau confondus est de 10 063 m³, soit 5 fois inférieurs à la limite de calcul possible de l'équation de Gorham. Cette équation, basée sur les grands lacs profonds, ne

semble pas répondre aux conditions locales de nos territoires dominés par des plans d'eau artificiels comme peut l'être la France dans sa globalité, ou pour des petits lacs très présents dans de plus hautes latitudes. La corrélation du bilan thermique est-elle réalisable à partir du volume d'eau pour les petits étangs ou un autre élément permet-il d'établir de nouvelles corrélations ?

Les recherches de N. A. Allot (1986) sur six petits lacs irlandais et L. Touchart (2016) sur trois étangs limousins ont mené à de nouvelles équations concernant quasi-exclusivement les petits plans d'eau. Les lacs étudiés par Allot s'étendent d'une profondeur moyenne de 2,7 à 11 m et des superficies de 2 à 110 ha. Ces études permettent de border la limite supérieure du passage entre des morphologies stagnante et lacustre. Les lacs sont situés dans un climat hyper-océanique, à proximité immédiate (20 km) de l'océan Atlantique, sur la façade ouest irlandaise. Les résultats de la recherche d'Allot montrent une forte corrélation (coefficient de 0,99) entre le bilan thermique et la profondeur moyenne. L'équation linéaire est la suivante :

$$(7) \quad BT: 1100 * Zm + 1800 \quad \text{Avec } Zm : \text{profondeur moyenne (m), et BT : bilan thermique (en cal /cm}^2\text{)}.$$

Cette équation fonctionne globalement bien pour des plans d'eau de bien plus petite taille que ceux longuement étudiés par Gorham, Hutchinson ou Birge, focalisés sur les grands lacs de notre planète. Cependant, elle reste à affiner pour les plans d'eau que l'on considère comme étangs, soit ceux dépassant rarement les 3m de profondeur moyenne et les 6m de profondeur maximale. Pour ce faire, L. Touchart proposa l'équation suivante basée sur trois étangs et leur profondeur moyenne (Touchart, 2016) :

$$(8) \quad BT = 205,18x^2 + 2114x \quad \text{Avec } x : \text{profondeur moyenne du plan d'eau (m)}$$

Cette nouvelle équation ouvre des perspectives d'étude sur les plus petits plans d'eau et par conséquent les étangs, applicable aux régions de fortes concentrations. Ces calories peuvent être déversées dans le cours d'eau de manière continue ou par intermittence lors de vidanges. Dans ces deux cas, lorsque l'on sait que l'étang peut engendrer une pollution thermique du cours d'eau, la connaissance de la contenance calorifique des têtes de bassin peut s'avérer utile. Le risque de détérioration de la qualité de l'eau en aval est lié au volume.

La contenance du bilan thermique des plans d'eau permet une estimation du risque et des échanges possibles de calories entre plans d'eau.

Cependant, la formule développée par le professeur Touchart est réduite à trois plans d'eau, sur des années différentes. Afin d'améliorer la précision, il serait judicieux d'ajouter des éléments hydrologiques à cette étude et de cartographier les premiers résultats à une échelle régionale.

2.2.4.12 Mise en place d'une nouvelle équation d'extrapolation du bilan thermique appliquée aux petits plans d'eau

Les premières tentatives d'extrapolation du bilan thermique et de recherches de corrélations avec des éléments morphologiques ou climatiques donnent des résultats moyennement satisfaisants pour les petits plans d'eau, ou pas assez développés, comme c'est le cas pour l'équation de Touchart (2016). Nous avons décidé de combiner les données utilisées pour les recherches d'Allot et de Touchart avec nos données personnelles. Un lac estonien de culot de glace morte (lac Martiska, région de Kurtna), de profondeur moyenne et surface proches de celles des étangs sous nos latitudes sera ajouté afin d'étudier les possibles interactions avec les conditions climatiques. La variation temporelle des données utilisées, s'étalant de 1984 à 2018, n'est pas gênante car le bilan thermique interannuel, lui, ne connaît qu'une petite variation (Birge, 1915, Huthchinson, 1957).

Tableau 6: Caractéristiques morphométriques des plans d'eau utilisés dans la corrélation. Sources: Touchart, 1999 à 2002, Allot, 1986 et Choffel, 2016 à 2018

Nom du plan d'eau	Pays	Profondeur moyenne (m)	Bilan thermique annuel (cal/cm ²)	Année
Baerenthal	France	1,02	2550	2017-2018
Rilhac	France	2	3908	2016-2018
Ramade	France	1,2	2900	2016-2018
Oussines	France	1,07	2485	2002
Cieux	France	1,65	4316	2002
Pouge	France	2,06	4418	2000
Landes	France	0,82	2047	2004
Black lake	Irlande	4,1	6310	1986
Bear lake	Irlande	2,7	4770	1986
Ballycullinan North	Irlande	3,9	5730	1986
Martiska järv	Estonie	2,5	3268	2017

De même que pour les précédentes équations développées par les différents auteurs, la profondeur moyenne des plans d'eau semble le mieux corrélée avec le bilan thermique annuel. Les tentatives de corrélations ont été effectuées à deux niveaux, en ne prenant que les « étangs » à proprement parler, puis en étendant les mesures aux petits lacs.

...A partir des étangs français

En ne prenant que les six étangs situés en Limousin à l'exception de l'étang de Baerenthal (Moselle), la corrélation linéaire entre le bilan thermique et la température moyenne est de $R^2=0,89$. L'équation obtenue en ne prenant en compte que les étangs français est la suivante :

$$(9) \quad BT = 1827,4 Zm + 668,42$$

Sur ces six étangs étudiés, des tentatives de corrélation avec la profondeur maximale, profondeur relative, le rapport dynamique et la superficie ne donnent aucun résultat satisfaisant. Des plans d'eau comme celui de Rilhac, de très faible superficie et de profondeur maximale importante ne permettent pas de corrélation efficace, au même titre qu'un grand étang peu profond comme celui de Landes. Les écarts de morphologie entre les étangs, liés à la fois à leur zone géographique et à leur fonction, sont des contraintes majeures à l'élaboration d'une corrélation efficace. Néanmoins, en ne prenant que la profondeur moyenne, la formule de calcul du bilan thermique des étangs est acceptable en l'état.

... En complétant avec des lacs peu profonds

Afin d'étendre l'analyse à un nombre plus important de petits plans d'eau, trois lacs irlandais, issus des recherches d'Allot (1986) ont été ajoutés, ainsi que le lac Martiska, (profondeur maximale : 8 m, profondeur moyenne : 2,5 m) en Estonie, étudié lors de campagnes de terrain en 2017. Les trois lacs irlandais sont le lac Black (Profondeur maximale : 6 m, profondeur moyenne : 4,1 m), Bear (4,8 m, 3,9 m) et Ballycullinan North (8 m, 4,1 m). Ces plans d'eau ont des caractéristiques morphologiques propres aux lacs mais sont considérés comme des petits plans d'eau, à la limite morphologique étang/lac.

La corrélation diminue légèrement lorsque l'on prend en compte tous les lacs et étangs pour atteindre la valeur de R^2 :0,85, soit légèrement inférieure à la corrélation précédente. L'équation de corrélation est la suivante :

$$(10) \quad BT = 1132,1 Zm + 1503,8$$

L'équation développée est tout à fait acceptable et l'on peut voir sur la figure ci-dessous que seuls l'étang de Cieux et le lac de Martiska (Estonie) dévient légèrement de la courbe de tendance (Figure 50). L'écart entre le bilan thermique calculé à partir de cette formule et le bilan thermique mesuré est de respectivement +9,94 % et -14,02 %. L'écart moyen observé est de 4,89 % pour l'ensemble des plans d'eau. Cette mesure est légèrement inférieure à celle issue du calcul d'Allot, avec 5,06 %, plus adaptée aux petits lacs, et à celle issue du calcul de Touchart avec 13,62 %. Cette dernière s'adapte parfaitement aux étangs (4,50 %) mais ne peut pas s'étendre aux lacs, surestimant largement leur bilan thermique. Les marges d'erreur ont leur intérêt et sont à relier à celles liées aux variations de zones climatiques et aux variations interannuelles.

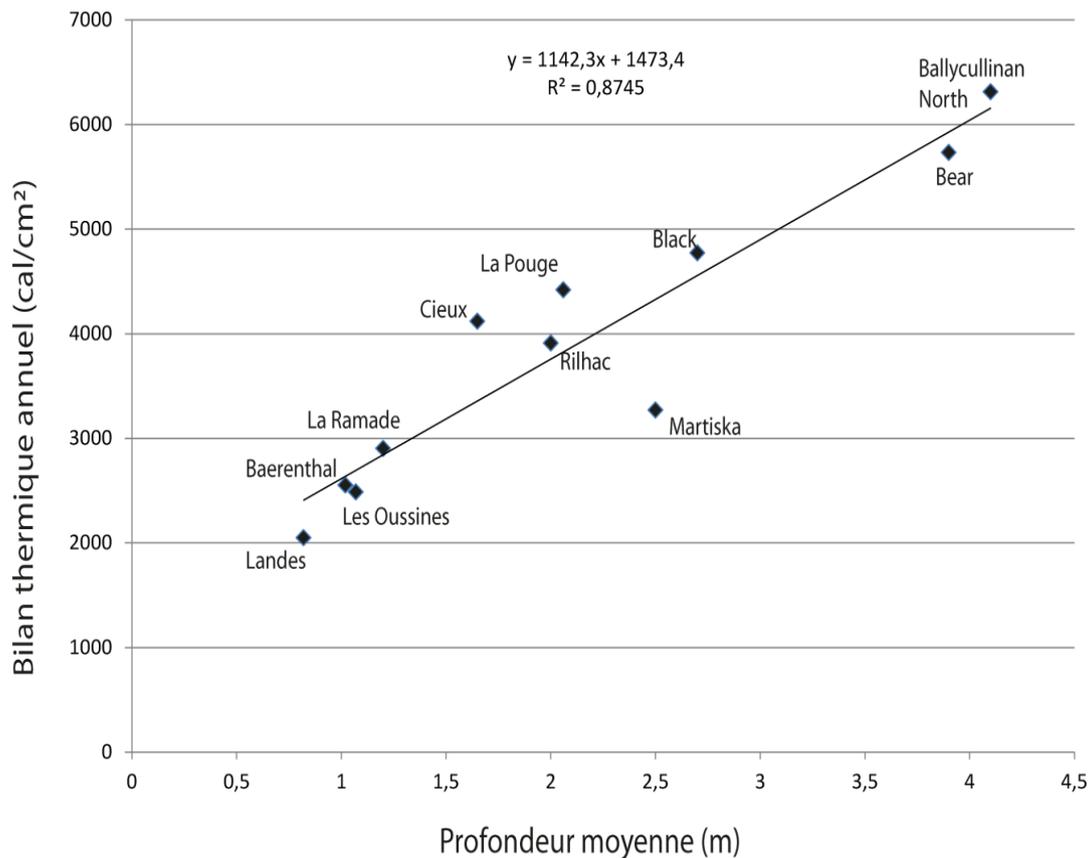


Figure 50: Graphique de corrélation entre le bilan thermique et la profondeur moyenne de petits plans d'eau (Sources: Allot, 1986, Touchart, 1999 à 2002, Choffel, 2016 à 2018)

La répartition des étangs au sein du graphique de corrélation forme plusieurs groupes distincts. Pour les plans d'eau jusqu'à environ 3m de profondeur moyenne, l'utilisation de la formule « étang » semble adaptée et donne, dans notre cas, un pourcentage d'erreur de seulement 2,52 %. Au-dessus de cette limite, il est préférable d'utiliser l'équation donnée par Allot, concernant de plus grandes pièces d'eau. Enfin, nous continuons à penser que pour des plans d'eau que l'on peut qualifier de peu profond, englobant les étangs et lacs avec une profondeur moyenne de maximum 5 m environ, la formule développée ici, avec l'ensemble des plans d'eau, fonctionne correctement. Une marge d'erreur de moins de 5 % permet une bonne estimation. Les différences géographiques des plans d'eau et l'écart temporel des données disponibles induisent une marge d'erreur supplémentaire. A noter que ces estimations sont faites sur 10 entités, et qu'il serait préférable de les tester sur un nombre plus conséquent. Il reste cependant difficile d'obtenir des données de bilan thermique pour des plans d'eau peu profonds, l'essentiel des recherches limnologiques se focalisant encore à l'heure actuelle sur les plus grands lacs de la planète. Les premiers résultats

cartographiques constituent un outil d'aide à la décision intéressant pour la gestion du risque thermique à petite échelle cartographique.

4.3.2 L'extrapolation à l'échelle d'une région d'étangs : le Limousin

A l'échelle régionale, notre choix s'est porté sur l'ancienne région administrative du Limousin, bénéficiant de l'étude de 6 étangs et faisant partie des régions stagnustres les plus importantes du pays (Bartout, 2006). Les étangs couvrent une zone plutôt large de la région Limousine, des hauts plateaux de Millevaches, au Haut-Limousin ainsi que le bassin de Gouzon (Figure 51).

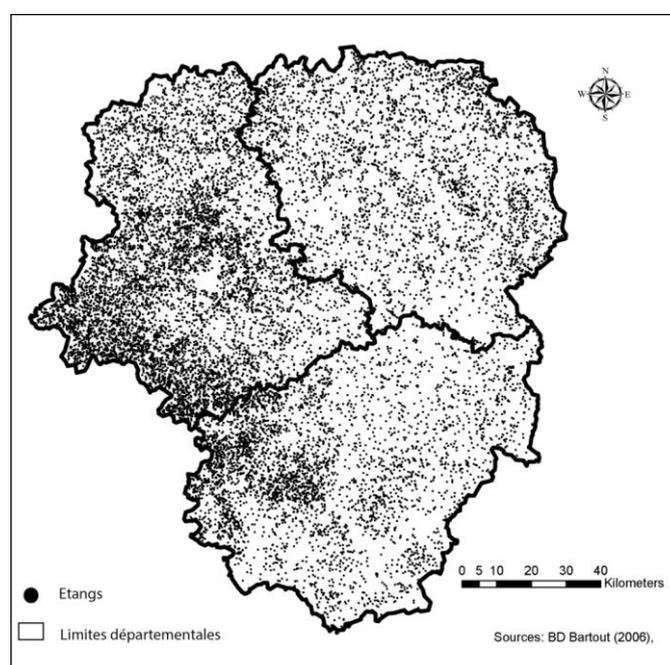


Figure 51: Localisation des étangs dans la région du Limousin (Source: P. Bartout, 2013)

L'étude de Touchart et Bartout (2015) estime un volume total de 144 627 739 m³ pour les étangs limousins, compris entre 0,1 et 100 ha. La superficie des étangs de cette région de 11 610 ha (Bartout, 2006) nous permet de déduire une profondeur moyenne des petits plans d'eau de 1,24 m. Cette moyenne est particulièrement haute comparée à la moyenne française d'environ 0,9 m. Cette particularité des étangs des massifs anciens et moyennes montagnes réside dans leur localisation en fond de vallon encaissé. Le barrage de ces vallées leur donne une profondeur maximale élevée, à l'inverse des étangs de plaine.

Pour estimer la contenance calorifique de la région, nous avons utilisé l'équation développée dans le chapitre précédent :

$$(11) \quad BT = 1827,4 Zm + 668,42$$

Avec BT : Bilan thermique, Zm : profondeur moyenne.

A partir de nos estimations de corrélations du bilan thermique avec la profondeur moyenne du plan d'eau, on obtient un bilan thermique moyen des étangs limousins à 2 934 cal/cm². Cette moyenne équivaut à un bilan thermique brut régional de 3,4^{E15} calories, obtenu en multipliant les 2 934 cal/cm² par la superficie totale stagnante du Limousin. Ce chiffre est une moyenne, elle souffre d'un manque de précision géographique et mérite d'être comparée et relativisée.

A titre d'exemple, nous avons calculé le bilan thermique du lac de Bort les Orgues afin de comparer la contenance calorifique d'une région d'étang avec celle d'un lac de barrage, situé dans la même région, dans le sud-est de la Corrèze. La retenue de Bort les Orgues est un plan d'eau de 1 055 ha, avec une profondeur maximale de 96 m et une profondeur moyenne de 33 m, avec un volume de 495 020 000 m³ (Fiche masse d'eau FRFL18, Agence de l'eau Adour-Garonne, 2015). Le calcul du bilan thermique du lac a été effectué sur l'année 2015, bénéficiant des données thermiques du 18 mars et 5 août 2015 (Agence de l'eau Adour-Garonne, portail Système d'Information sur l'Eau). L'homothermie mesurée le 18 mars à 5,5 °C donne une contenance calorifique de 25 806 cal/cm². Le 5 août, le lac est stratifié avec une température moyenne sur l'ensemble de sa colonne d'eau de 10,6°C amenant à une contenance calorifique de 49 736 cal/cm². Le bilan thermique est donc estimé à 23 929 cal/cm² pour l'année 2015³³. En multipliant ce bilan thermique par la superficie du lac, on obtient une valeur brute de 2,5^{E15} calories.

Les 1 055 ha de superficie du lac de barrage de Bort les Orgues représentent 9,1 % de la surface en eau des étangs limousins. En revanche, il équivaut à 74,2 % de leur bilan thermique. En d'autres termes, le bilan thermique des trois-quarts des étangs limousins équivaut à celui de la seule retenue de Bort les Orgues.

³³Le calcul a été ici effectué en multipliant la température moyenne avec le volume du lac. Ce calcul est moins précis mais donne des résultats satisfaisants sur les étangs étudiés et donc sur le lac de Bort les Orgues. La marge d'erreur entre dans celles des conditions météorologiques annuelles et de la précision des données bathymétriques et thermiques.

Méthode avec les profondeurs moyennes Bartout 2006

L'inventaire de Pascal Bartout (2006) sur les plans d'eau Limousin intègre la profondeur maximale des 17 613 étangs répertoriés. Le bilan thermique peut être calculé directement, pour chaque étang, en utilisant la formule pour les petits plans d'eau peu profonds. La formule donne un bilan thermique moyen de 2 507 cal/cm² par étang, avec une profondeur moyenne d'environ 1,1 m. On obtient alors une contenance calorifique totale des étangs limousins équivalente à 2,9^{E15} calories, proche des 2,5^{E15} calories du lac de Bort les Orgues. Dans ce calcul d'après l'inventaire de Bartout (2006), le barrage de Bort les Orgues représenterait 86,2 % de la contenance calorifique des étangs limousins.

L'absence d'informations précises sur la profondeur moyenne des étangs à l'échelle d'une région génère d'importantes marges d'erreur. D'après les deux méthodes de calcul, le potentiel d'absorption calorifique des étangs limousins est compris entre 2,9^{E15} et 3,4^{E15} calories sur une année. Le lac de barrage de Bort les Orgues a une contenance calorifique estimée entre 74 et 86 % de celle des 17 613 étangs limousin, pour 9 % de leur superficie totale.

4.3.3 Répartition géographique de la contenance calorifique des étangs limousins

Les calories des étangs sont inégalement réparties au sein de la région, suivant une logique de présence des étangs, mais aussi en lien avec leur profondeur moyenne et leur superficie. Les régions du plateau de Millevaches et de la Marche ont les contenances calorifiques totales³⁴ les plus élevées du Limousin, supérieures à 1,4^{E15} calories. Avec 1,7^{E15} calories, les étangs du plateau de Millevaches regroupent 14,17 % des calories totales des étangs limousins (Figure 52). La partie centrale et nord du Limousin, contient le plus de calories stagnustres, regroupées dans la Marche et Millevaches. Les extrémités nord-est et sud du Limousin sont les plus faiblement calorifiques. Au sud, les étangs y sont peu nombreux et de superficie modeste. Le Ségala, le Bas-Pays de Brive ainsi que la petite partie du Causse de Gramat et de Limogne contiennent peu d'étangs. Le Haut-Limousin a la plus forte

³⁴La contenance calorifique totale correspond à la somme des contenances calorifiques de chaque cm² d'étangs

concentration d'étangs (Bartout, 2006), mais la contenance calorifique reste relativement faible.

A l'échelle des bassins versants l'analyse est cohérente lié à la possible restitution des calories dans le cours d'eau, les bassins versants de l'ouest du plateau de Millevaches ont les plus fortes concentrations calorifiques. La Vézère, la Dordogne et la Vienne sont les plus fortement concernées, avec des valeurs entre 7,2 et 8,8^{E15} calories. Les parties amont des cours d'eau sont les plus affectées, prenant leur source sur le plateau de Millevaches pour la Vienne, la Vézère et la partie ouest de la Dordogne, soit principalement le Chavanon. Plus les cours d'eau s'écoulent vers l'aval, plus la contenance calorifique stagnustre est faible, à l'exception de quelques cours d'eau tels que la Dordogne et la Creuse, où la partie intermédiaire a des valeurs supérieures. La Vézère concentre un fort potentiel calorifique des étangs, principalement dans sa partie amont sur le plateau de Millevaches, puis plus en aval, traversant le Haut Limousin. La contenance calorifique totale du bassin versant de la Vézère est de 8,8^{E15} calories, soit 7,2 % des calories régionales totales.

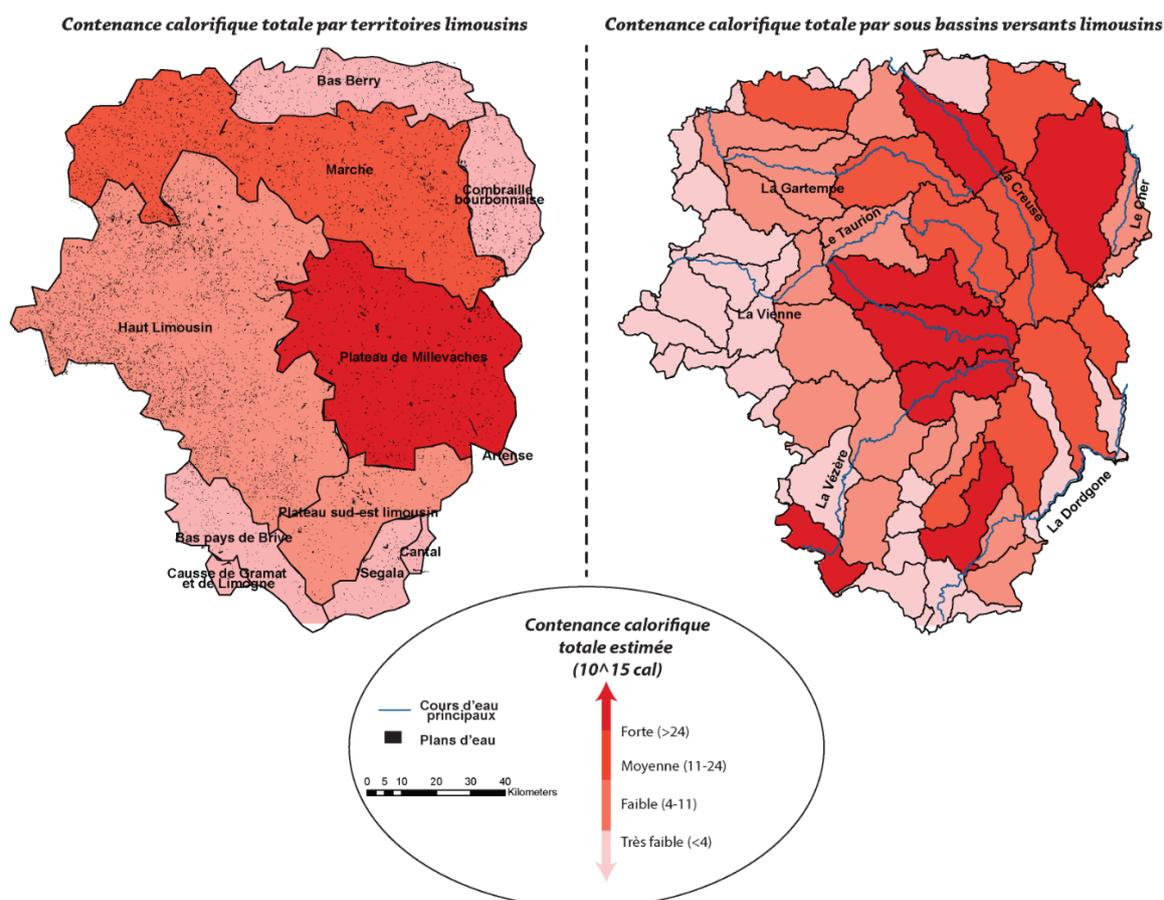


Figure 52: Contenance calorifique des territoires et sous bassins versants limousin. Q. Choffel, 2019

Le plateau de Millevaches est le château d'eau du Limousin, où la grande majorité des cours d'eau prennent leur source. Il semblerait que ce haut plateau soit également la source des calories stagnantes de la région Limousine. Il regroupe 7,4 % des 14 310 étangs, mais 14,2% des calories. Les étangs sont de plus grande superficie qu'en Haut Limousin, où leur densité est forte. Les étangs du plateau de Millevaches ennoient des fonds de vallons humides de grande superficie et peu encaissés. A quelques exceptions près, c'est sur ce plateau que l'on retrouve les plus grands étangs, supérieurs à 50 ha, dont l'étang de la Ramade et ses 62 ha. La superficie moyenne des étangs de Millevaches est de 1,4 ha, contre 0,76 ha de moyenne pour le reste du Limousin.

La problématique du déversement possible des calories des étangs dans le cours d'eau, partiellement par écoulement continu ou totalement lors des vidanges, est géographique. Certaines régions, notamment celles où sont concentrés les plus grands plans d'eau, sont concernées. En Limousin, une forte disparité existe entre la partie ouest et est de la région. Tandis que les plus fortes densités d'étangs concernent la partie ouest, c'est la partie est qui est la plus concernée par le risque de dégradation des eaux due à l'apport calorifique des étangs au cours d'eau. D'un point de vue de gestion, la focalisation sur certains bassins versants les plus concernés peut être cohérente afin de limiter les opérations localisées et parfois sans intérêt réel.

Conclusion partie II :

Le bilan thermique des étangs diffère de celui des lacs par leur capacité à alterner les phases de brassage et de stratifications pendant la période estivale, sur des phases plus ou moins longues selon la profondeur du plan d'eau. Un petit étang profond a un fonctionnement thermique se rapprochant de celui d'un lac par sa capacité à se stratifier et garder une forte stabilité durant la totalité ou quasi-totalité de la période estivale. Ce rapprochement avec le fonctionnement lacustre est possible grâce au fetch réduit et à une profondeur relative importante permettant de lutter contre le forçage externe. A l'inverse, les étangs peu profonds, de profondeur moyenne d'un mètre environ, proche de la moyenne française, connaissent des alternances régulières de brassage lors des phases de stratifications thermiques estivales, environ tous les 10 jours et donc se différencient en cela du lac. La faible profondeur limite l'augmentation du bilan thermique, celui-ci étant tout de même élevé grâce à l'apport de chaleur dans les couches de fond par l'action mécanique du vent pouvant perturber la faible stratification thermique. A une plus grande échelle, les étangs sont loin d'emmagasiner la même quantité de calories que les lacs et réservoirs. L'étude sur la région du Limousin géographique montre que le lac de barrage de Bort les Orgues représente à lui seul plus de 80% du bilan thermique stagnustre de la région, pour moins de 10% de la superficie en eau des étangs.

Cette deuxième partie nous a montré l'intérêt de prendre en compte l'étang comme un milieu avec un fonctionnement propre qui diffère de celui des grands lacs, et donc de celui de leur partie épilimnique. L'utilisation d'un bilan thermique adapté aux étangs offre des possibilités de compréhension du milieu dans sa dimension verticale, non plus comme une troncature du lac, mais bien comme un petit plan d'eau polymictique au fonctionnement particulier. Cette analyse permet de différencier les contenances calorifiques des très nombreux qui restent malgré tout plus réduites que celles observées pour les lacs profonds, y compris les lacs de barrage. La prise en compte des calories, en intégrant les volumes d'eau, dissocie les différentes masses d'eau et permettra d'analyser les échanges entre les masses d'eau à revoir car répétition, qu'elles soient lentiques et lotiques.

Cette mise en avant du bilan thermique stagnustre nous permet de bloquer la variable verticale, la plus couramment étudiée, et d'intégrer ensuite celle horizontale en étang. Le volume d'eau réduit des étangs permet à des influences locales, telles que la présence d'un

tributaire, l'effet du vent, ou encore l'environnement immédiat du plan d'eau, d'avoir un effet sur la répartition de chaleur au sein de l'étang. C'est pourquoi nous devons nous pencher dans les parties suivantes sur les questions de zonation thermique, en fonction des facteurs externes pouvant modifier la masse d'eau, selon la morphologie, la localisation ou les échanges hydrologiques au sein des étangs.

**Partie III : Une géographie thermique des masses d'eau
conditionnée par les variations verticales et horizontales
de température**

La répartition de chaleur au sein de l'étang est conditionnée, dans sa composante verticale, par la profondeur du plan d'eau. Nous avons proposé un nouveau modèle de bilan thermique d'étang dans la partie précédente, axé sur l'étude verticale de la structure thermique des trois étangs étudiés. Ce modèle ne prend cependant pas en compte les questions de zonation de la température pouvant avoir une part importante dans la variation du bilan thermique, et notamment pour les petits plans d'eau (Abbasi *et al.*, 2016). De fait, la prise en compte géographique de la répartition des calories est nécessaire et peut être étudiée à deux échelles, celle du bassin versant dans les échanges entre cours d'eau et étangs, et celle de l'étang, où des facteurs externes peuvent modifier la répartition de chaleur.

A l'échelle du bassin versant, l'étude des échanges calorifiques vient compléter celle de la seule thermie en y intégrant les questions de volume et de débits. Cet apport prend tout son sens lorsque l'écart entre le débit du cours d'eau et le volume de l'étang est conséquent ou, lorsque d'un point de vue de gestion, la mise en place d'une dérivation est envisagée (Millot, 2015). L'analyse calorifique permet de comparer l'influence des petits étangs de tête de bassin et celle des grands étangs situés sur des cours d'eau de rangs de Strahler plus élevés. A l'échelle de l'étang, l'intérêt est de connaître et mesurer les facteurs capables de créer une hétérogénéité spatiale, horizontale, de la température de l'eau. Selon la morphologie du plan d'eau, l'attention sera attirée sur l'influence de la force motrice du vent (Papon, 2006) sur un grand étang ou sur l'environnement immédiat (Markford *et al.*, 2009) avec la présence d'une zone d'ombrage sur un très petit plan d'eau. Enfin, l'influence des échanges hydrologiques, par l'arrivée d'eau d'un tributaire, à l'image du phénomène de la Bataillère en lac (Gorceix & Kreitmann, 1930), ou par l'arrivée d'eau de nappe, sera étudiée sur étang à temps de rétention court. L'approche hydrologique sera complétée par l'étude de petits lacs estoniens, morphologiquement proches des étangs, dépendants de l'apport d'eau souterraine pour deux d'entre eux, et de la construction d'un canal comme tributaire pour le troisième.

En incorporant l'aspect spatial dans cette étude limnologique, notre question principale en cette troisième partie est la suivante : comment l'analyse spatiale de la répartition de calories permet-elle une compréhension du fonctionnement du milieu stagnustre et des

échanges entre l'étang et le cours d'eau ? Nous nous appuierons sur une analyse à deux échelles, formant les deux chapitres de cette partie.

Dans un premier chapitre, il sera question d'analyser les échanges thermiques au sein d'un bassin versant en plaçant l'étang au centre de l'étude. En utilisant une approche limnocentrée, la question des calories viendra compléter celle des températures, en apportant la connaissance des volumes échangés. Cela conduira à une analyse calorifique des différents types d'étangs, selon leur morphologie et leur localisation dans le bassin versant afin de caractériser leur influence thermique sur le milieu aval.

Il s'agira ensuite de se focaliser sur le milieu stagnustre et sa capacité à développer une hétérogénéité spatiale en fonction de sa morphologie dans un premier lieu, puis des apports hydrologiques de surface ou souterrain ensuite. Pour les grands étangs multilobés où l'hypothèse de variation spatiale est la plus forte, il s'agira de vérifier cette hypothèse d'après la force et la direction du vent. En étudiant un petit étang de 0,4 ha nous analyserons s'il existe des variations horizontales de température pour les très petits étangs, en lien avec l'effet d'ombrage. Enfin, pour les étangs où des influences hydrologiques sont conséquentes, nous tenterons dans un premier temps de quantifier la possible influence du cours d'eau entrant dans l'étang. Dans un deuxième temps, nous nous attarderons sur deux lacs hydrologiquement dépendants aux apports de la nappe afin d'évaluer l'influence d'une arrivée d'eau souterraine sur la structure thermique du lac.

Chapitre 5 : Les territoires d'échanges entre le plan d'eau et son environnement

La température de l'eau est le facteur qui se propage le plus loin en aval (Williams, 1968). Il offre une indication de l'influence maximale d'une perturbation, l'ensemble des autres indicateurs perturbés sont sensiblement influencés sur une distance aval plus courte. De ce point de vue, la température est l'indicateur synthétique le plus intéressant et facile à étudier afin de comprendre les territoires d'échanges entre les plans d'eau et les cours d'eau. Il met en avant des changements dans les paramètres physico-chimiques des masses d'eau et peut être utilisé comme un traceur en milieu naturel (Birkinshaw & Webb, 2010).

5.1 Approche limnocentrée de l'étude du risque thermique

L'influence thermique des lacs de barrages sur le cours d'eau aval a été étudiée depuis plusieurs décennies. Ces barrages sont généralement caractérisés par un volume important et une prise d'eau hypolimnique. Ces caractéristiques sont propres à ces pièces d'eau et à l'aléa thermique qui en découle. L'étang et son fonctionnement particulier n'a que peu bénéficié de suivis thermiques. Les quelques études ont mis en avant l'importance de la profondeur et du type de sortie d'eau de l'étang (Webb & Walling, 1996, Maheu *et al.*, 2016a, 2016b). Les morphologies des étangs, leur forme, profondeur et leur temps de rétention vont dominer les caractéristiques des aléas thermiques aval. Les températures en aval, mais aussi leur récupération thermique, soit la distance impactée par l'étang, diffèrent selon le débit du cours d'eau, l'apport d'affluents, la pente, etc. De nombreux facteurs interviennent dans ces analyses, dont la présence d'autres perturbations anthropiques sur le cours d'eau ou encore l'absence de ripisylve influençant la distance de récupération thermique naturelle du cours d'eau.

Des études sur l'aléa thermique à l'aval des lacs de barrage puis des étangs ont conduit à un questionnement dont les réponses sont encore peu développées (Touchart, 1999). Existe-t-il toujours une relation entre la température à l'amont et celle à l'aval d'un

étang, ou disparaît-elle comme pour les grands lacs ? D'un point de vue géographique, jusqu'à quelle distance peut-on la retrouver à l'aval ? Lorsque l'on sait que l'impact thermique d'un lac peut se disperser sur plusieurs centaines de kilomètres à l'aval, quelle peut être la zone d'influence d'un étang ?

L'objectif est de comprendre l'influence de l'hétérogénéité verticale de l'étang sur le cours d'eau aval. L'analyse se portera sur deux grands étangs en barrage, l'étang de la Ramade en Creuse et l'étang de Baerenthal en Moselle. Elle sera complétée par l'étude de petits étangs en tête de bassin dont la taille et le volume diffèrent fortement de celui des grands étangs.

5.1.1 L'étang en barrage sur cours d'eau : un élément récepteur de l'amont et moteur de son aval ?

L'étude de deux étangs en barrage de cours d'eau permet d'approcher la problématique des transferts de chaleur entre l'amont et l'aval d'un étang. Le réchauffement causé par les étangs lors de la période estivale dépend du type d'étang, de son système de sortie d'eau et de sa localisation s'il est situé dans une chaîne d'étang (Touchart & Bartout, 2010, 2011). L'étude de deux étangs situés entre la tête de bassin et la partie aval, composés de déversoirs de surface pour l'un et de déversoir et vannes de fond pour l'autre, permet de cadrer l'influence thermique de ce type d'étang dans ses valeurs maximales, ses moyennes ainsi que la distance d'influence moyenne et maximale.

2.2.4.13 L'influence d'un étang sortie mixte, de surface et de fond

Sur l'année 2016, les affluents et l'émissaire de l'étang de la Ramade sont suivis thermiquement par la Maison de la Pêche du département de la Creuse. Les thermomètres ont été installés à environ 1 km en amont et en aval de l'étang. L'étang possède un système de déversoir des eaux de surface, représentant la grande partie du débit sortant durant les mois à excédent hydrologique, mais aussi deux vannes de fonds assurant un écoulement permanent même lors des périodes de basses eaux. Nos données thermiques à l'intérieur de l'étang permettent de comprendre les causes des écarts entre l'entrée et la sortie et de ne pas se limiter à une étude descriptive.

Sur la période du 3 mars au 14 septembre 2016, l'écart thermique moyen entre la moyenne des deux affluents et l'émissaire de l'étang est de **+1,3°C**. L'écart maximum positif, soit un émissaire plus chaud que les tributaires, est de **+6,5°C** sur la période, contre un refroidissement maximum du **-4,6 °C**. La tendance globale est à un léger réchauffement du cours d'eau par l'étang. Sur la période étudiée, ce dernier augmente la température du cours d'eau aval sur 81 % du temps, avec des augmentations de 1°C ou plus sur 59 % du temps, de 2°C ou davantage sur 36 % du temps et de 4°C ou plus sur 4% du temps. Le cours d'eau aval est refroidi par l'étang sur 19 % du temps.

Au printemps, l'étang va perturber ponctuellement le cours d'eau aval par des écarts thermiques alternant des réchauffements et refroidissements, entrecoupés de phases neutres. Les courtes phases de stratifications thermiques directes provoquent alors des réchauffements ponctuels de l'émissaire. Par temps ensoleillé, l'eau de surface se réchauffe et se déverse dans le cours d'eau aval par le déversoir de surface de l'étang. Les courtes stratifications thermiques journalières vont rythmer les phases de réchauffement de l'étang, réduites à quelques degrés, pour un maximum à 5,2°C le 19 avril 2016.

A partir de la fin du mois de mai, des tendances dans les écarts amont/aval se dessinent. Des phases de réchauffement du cours d'eau ont lieu sur plusieurs jours, jusqu'à une dizaine de jours au cœur de l'été. Ces phases de réchauffement du cours d'eau aval semblent correspondre aux périodes de brassage de l'étang, et non plus des stratifications thermiques. Malgré la prise d'eau de surface, le point de mesure situé à 1km en aval de l'étang enregistre des écarts thermiques maximums avec l'amont lorsque l'étang est brassé (Figure 53). Cela signifie que le cours d'eau aval voit ses minima se réchauffer, et non les maxima. L'écart thermique maximal entre l'amont et l'aval de 6,5°C a eu lieu le 19 août 2016 à 9h00. A ce moment de la journée, un temps dépressionnaire a brassé l'étang, dont la température de surface avoisine les 22°C. En revanche, le refroidissement nocturne s'est fait plus fortement ressentir sur les cours d'eau amont, dont la température moyenne des deux tributaires est de 13,1°C. Le cours d'eau aval est lui à une température de 19,8 °C à 1 km de l'étang.

L'écart thermique conséquent entre les cours d'eau amont et aval de l'étang est la conséquence d'une augmentation du minimum thermique diurne par l'étang dont la capacité

thermique est plus élevée que le cours d'eau grâce à son volume important, qui profite d'un emmagasinement de la chaleur provoqué par la convection mécanique.

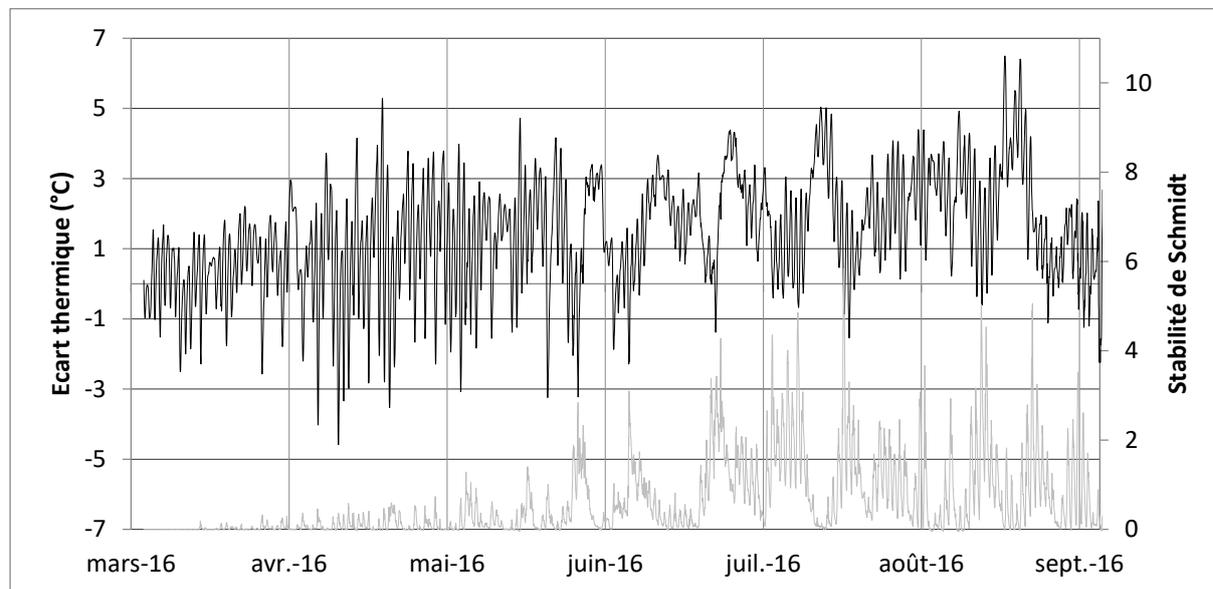


Figure 53: Stabilité de l'étang montrant les phases de stratification ($S>0$) et de brassage (gris) et écart de température amont-aval de l'étang de la Ramade (noir)

Lorsque l'étang subit un brassage forcé postérieur à l'accumulation de chaleur en stratification thermique, les écarts de température entre l'amont et l'aval de l'étang sont conséquents. Pour un étang à déversoir de surface, l'étang de la Ramade réchauffe le cours d'eau surtout en période de convection mécanique, c'est-à-dire selon un rythme décrit comme celui des étangs à moine d'après les études précédentes sur le sujet (Touchart, 2001, Touchart & Bartout, 2010). Il conviendra de discuter l'influence des sorties de fond, volontaires ou non, de cet étang, dont l'influence à l'aval semble conséquent.

Répartition spatiale du réchauffement stagnustre vers l'aval

Sur cet étang nous n'avons pas pu placer davantage de thermomètres plus loin à l'aval permettant de mesurer la récupération thermique naturelle du cours d'eau. Seul un thermomètre situé à 1 km de l'étang mesure la température de l'eau du cours d'eau aval. Des premières analyses montrent qu'il existe une récupération thermique forte sur le premier kilomètre, écart mesuré entre le thermomètre à la surface de l'étang, à la chaussée, et celui dans le cours d'eau aval. La récupération thermique moyenne, non pas en termes de distance ici mais en termes de température sur le premier kilomètre, est de 2,0°C. La valeur maximale de récupération est de 9,5°C (soit 94 % du réchauffement qui avait été provoqué par l'étang) contre -3,8°C de minima. Ces valeurs sont conséquentes et signifient que, dans le cas du

ruisseau de la Ramade où il n'y a pas d'affluent sur le premier kilomètre, la récupération thermique naturelle se fait fortement ressentir, malgré la faible présence de ripisylve. A l'inverse de l'écart thermique amont aval, la récupération thermique est plus forte lors des phases de stratification, c'est-à-dire lorsque la température de surface de l'étang est la plus chaude. Elle est plus importante au printemps et à la fin de l'été. L'étang, par son volume, permet d'avoir une inertie thermique alimentée par les échanges calorifiques entre la surface et le fond lors des phases de brassage suivant la stratification thermique. Ces phases permettent l'apport de calories au fond durant l'été, qui serviront de réservoir calorifique pour la fin de l'été. C'est à cette période que la récupération thermique est la plus forte, là où l'étang conserve des valeurs thermiques importantes, les températures de l'air froides, notamment matinales, permettent au cours d'eau de se refroidir rapidement.

2.2.4.14 Etude d'un étang à déversoirs de surface

L'étang de Baerenthal possède trois sorties d'eau, deux déversoirs de surface et une vanne de fond cette dernière étant cependant fermée et jamais activée. Seules quelques fuites permettent une sortie d'eau très limitée, réduite à 2,4 % des 0,6 m³/s de sortie d'eau. 70 % du flux d'eau sortant de l'étang se jettent par déversoir de surface vers l'étang du Ramstein, lequel est aussi muni d'une sortie d'eau de surface. Les 28 % restants sont déversés dans l'autre bras de la Zinsel du Nord, avant la confluence à quelques mètres à l'aval de l'étang du Ramstein³⁵. L'ensemble a été équipé par nos soins dans le cadre du contrat avec l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, en amont et en plusieurs points en aval de la sortie immédiate de l'étang (à 55 m) jusqu'à environ 7 km en aval.

L'évolution de l'écart thermique entre l'amont et l'aval immédiat de l'étang suit une courbe sinusoïdale, avec un maximum estival et un minimum hivernal. Le maximum correspond à la journée la plus chaude de la période d'étude, le 4 août 2018, avec **6,5°C** d'écart entre l'amont et l'aval à 15h. L'écart moyen est de **1,4°C** d'août 2017 à octobre 2018. Sur une moyenne annuelle, d'octobre 2017 à octobre 2018, l'écart amont-aval est de **1,3 °C**.

Durant l'hiver, l'étang de Baerenthal refroidit le cours d'eau aval ou n'a aucune influence sur celui-ci. Les temps de rétention très courts liés aux forts débits amont font que l'étang fonctionne comme un simple ralentissement des eaux. A partir du mois d'avril, l'étang

³⁵ Moyennes de deux mesures réalisées en avril et juin 2018 par nos soins. F. Donati & Q. Choffel, 2018

réchauffe le cours d'eau de 1 à 2°C en moyenne, puis atteint une moyenne de 2 à 4°C de juin à septembre, avant de retrouver une valeur proche de 0 en octobre. De rares phases ponctuelles entraînent des réchauffements supérieurs à 5°C. Sur la période d'octobre 2017 à octobre 2018, 77h de mesures ont dépassé les 5°C d'écart entre l'amont et l'aval direct, soit 0,84 % du temps étudié. La tendance de la courbe des écarts amont-aval de l'étang de Baerenthal se rapproche de celle de la température de l'air (Figure 54).

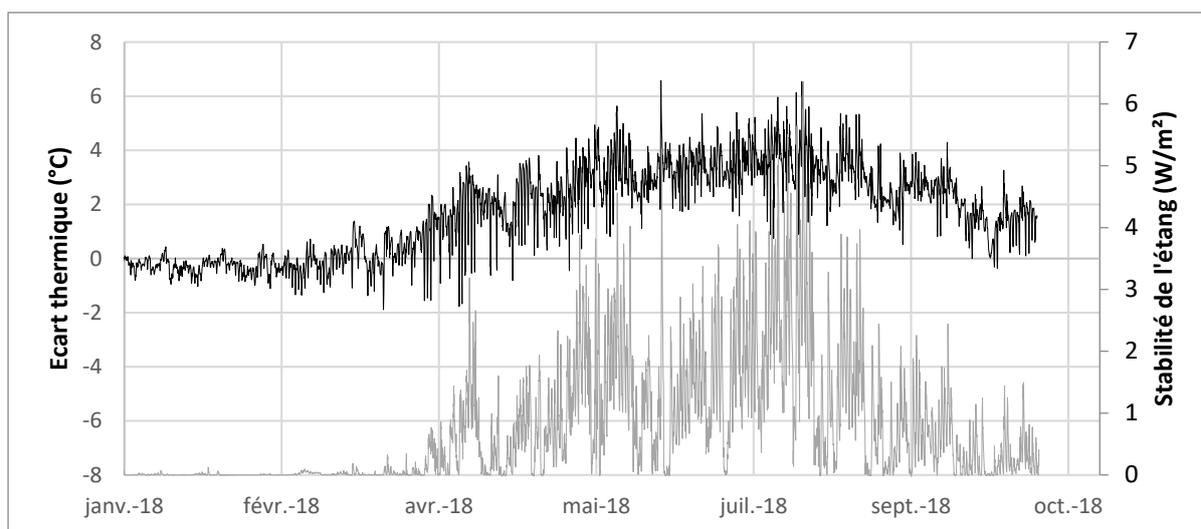


Figure 54: Stabilité de l'étang montrant les phases de stratification ($S > 0$) et de brassage (gris) et écart de température amont-aval de l'étang de Baerenthal (noir)

C'est lors des phases de stratification que l'impact de l'étang de Baerenthal sur le cours d'eau est le plus élevé. Lors des brassages, l'impact thermique est réduit. Les maxima de réchauffement ont lieu en la fin de journée, aux alentours de 18h lorsque la surface de l'étang est la plus réchauffée. Cependant, le maximum a été mesuré le 4 août 2018 à 8h, là où le cours d'eau a subi le refroidissement nocturne alors que l'étang a conservé sa chaleur.

Récupération thermique du cours d'eau: quelle distance d'influence de l'étang ?

Du 11 août 2017 au 15 juin 2018³⁶, l'écart moyen entre le cours d'eau amont et les thermomètres situés à la sortie directe de l'étang de Baerenthal, puis à 1 km à l'aval, est respectivement de 0,8 et 0,7°C. L'écart maximum est également diminué à 1 km de l'étang, avec respectivement 5,6°C à l'aval immédiat et 5°C quelques centaines de mètres plus loin.

³⁶Dates pour lesquelles nous possédons les données pour un thermomètre situé à 1 km à l'aval, un problème technique ayant empêché d'avoir une période de mesures plus longue.

A une plus petite échelle, l'évolution de la température moyenne estivale a été cartographiée pour l'ensemble des points de mesure à l'amont et l'aval de l'étang de Baerenthal afin d'obtenir un aperçu lors du maximum de réchauffement de l'étang (Figure 55). La particularité de l'étang de Baerenthal est la présence d'un autre étang immédiatement à une sortie, venant accentuer le réchauffement par un effet cumulé. Sur la période de Juillet et Août, où les valeurs de réchauffement sont maximales, la température à la sortie d'eau du premier étang est de 22,8°C de moyenne, tandis qu'elle est supérieure, à la sortie du second étang (23,8°C). Cet effet de cascade empêche une récupération thermique normale et va même accentuer le risque thermique sur le cours d'eau aval. A environ 6 km en aval, la température moyenne mesurée sur les deux mois estivaux est proche de celle mesurée à l'amont de l'étang, sans toutefois atteindre un chiffre aussi bas. L'amont de l'étang est la seule partie où la température ne dépasse pas les 20°C de moyenne sur les deux mois, avec 19,3°C, à l'exception du secteur plus en amont influencé par la présence de deux grands étangs. A la distance aval maximale mesurée, la température est réduite à 20,3°C de moyenne estivale (Figure 55).

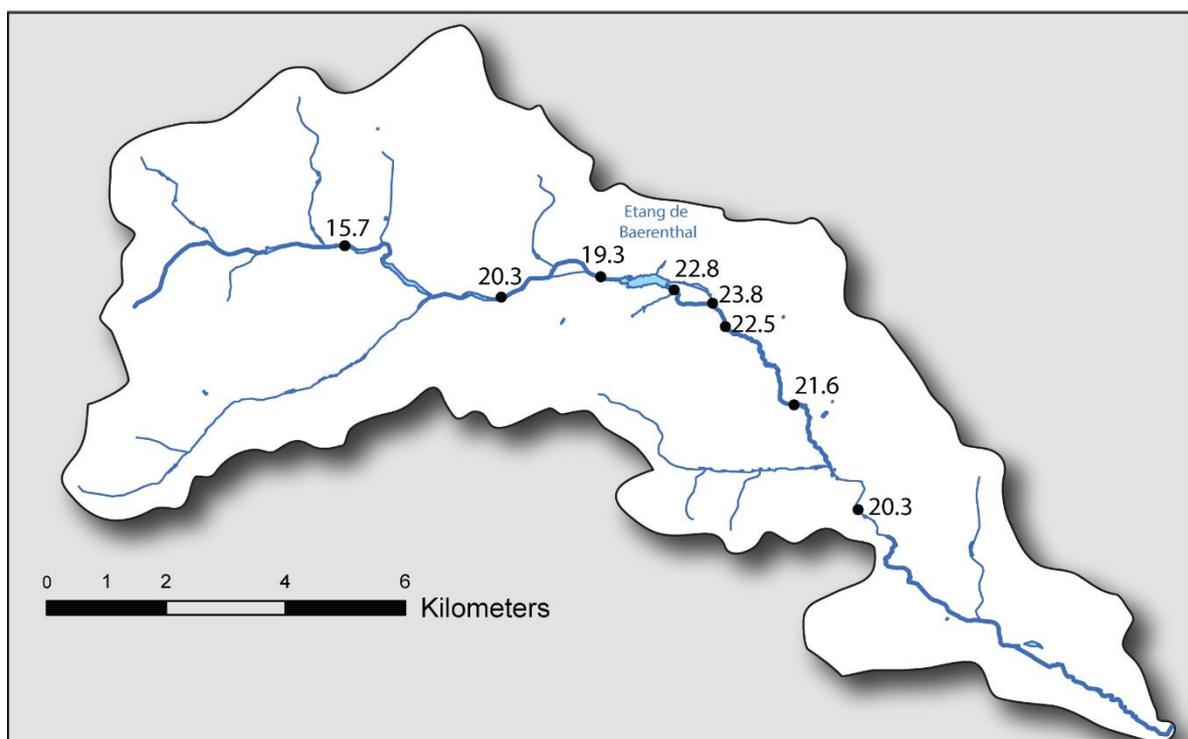


Figure 55: Température moyenne estivale (Juillet et Août) sur le cours d'eau principal de la Zinsel du Nord. Q. Choffel, 2018

En prenant comme valeur de réchauffement maximal la sortie du second étang, la récupération thermique est de 3,5°C sur 6 km pour la moyenne de juillet et août. La récupération thermique est donc, sur la moyenne estivale, soit lors du maximum de réchauffement, d'environ **0,6°C/km**. La récupération est la plus forte dans les premiers mètres, avec 1,3°C sur 700m, soit 1,9°C/km. L'écart moyen de température entre l'amont et l'aval immédiat de l'étang est de 3,4°C sur juillet et août. Il faut donc en moyenne 5,8 km pour que le cours d'eau retrouve sa température avant perturbation par le complexe d'étang de Baerenthal. Sur les mesures annuelles (du 1^{er} octobre 2017 au 1^{er} octobre 2018), l'écart moyen amont-aval du complexe d'étang est de 1,5°C, ce qui constitue une zone d'influence moyenne de 2,5 km. Cette zone est l'aire d'influence la plus forte de l'étang sur le cours d'eau d'un point de vue thermique. Le territoire aval des deux kilomètres est celui le plus fortement impacté dans les valeurs et les cycles de température du cours d'eau. Il est perturbé par l'étang de manière quasi-permanente. Avec un écart maximum de 5,7°C à la sortie de l'étang, il faut donc à la Zinsel du Nord une distance maximale théorique de 9,5 km pour retrouver sa température avant le milieu lentic. Cette aire maximale peut être considérée comme l'aire d'influence exceptionnelle de l'étang sur le cours d'eau aval (Figure 56).

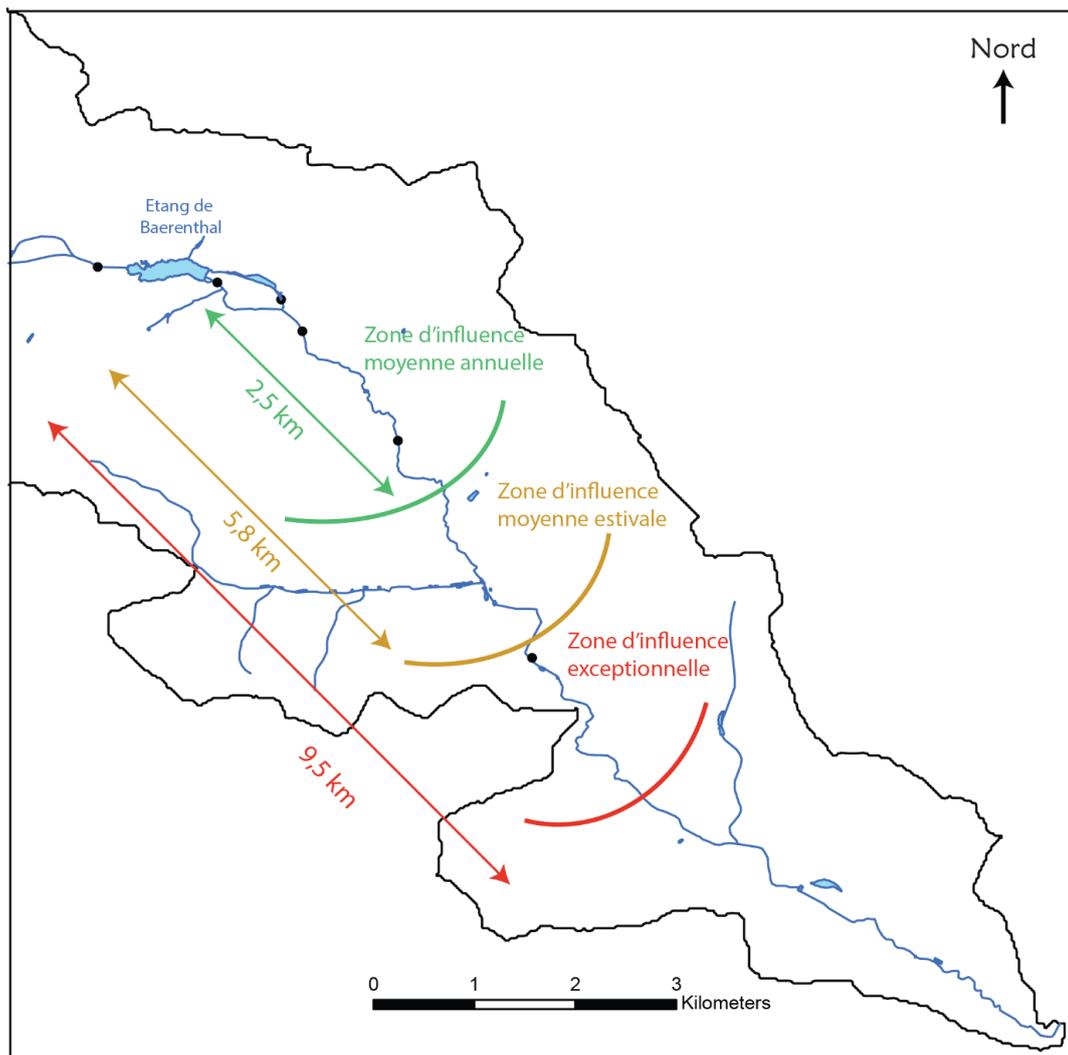


Figure 56: Zones d'influence moyenne et maximale annuelles estimées à l'aval de l'étang de Baerenthal. Q. Choffel, 2018

L'influence de l'effet de l'étang de Baerenthal sur le territoire aval peut être considérée ici dans la marge haute des étangs du fait du fort volume de l'étang de Baerenthal, de la plus faible ripisylve en aval ainsi que de la présence d'autres perturbations anthropiques liées notamment à la traversée d'un village (Figure 57). La présence de zones exposées à la radiation solaire dans le cours d'eau à l'aval peut réduire la capacité du milieu à récupérer sa température naturelle après perturbation (Touchart, 2007). Lorsque le cours d'eau traverse des zones urbaines il est également soumis à de possibles réchauffements de sources diverses, pouvant augmenter sa température jusqu'à plus de 10 °C dans les zones les plus exposées (Somers *et al.*, 2013).

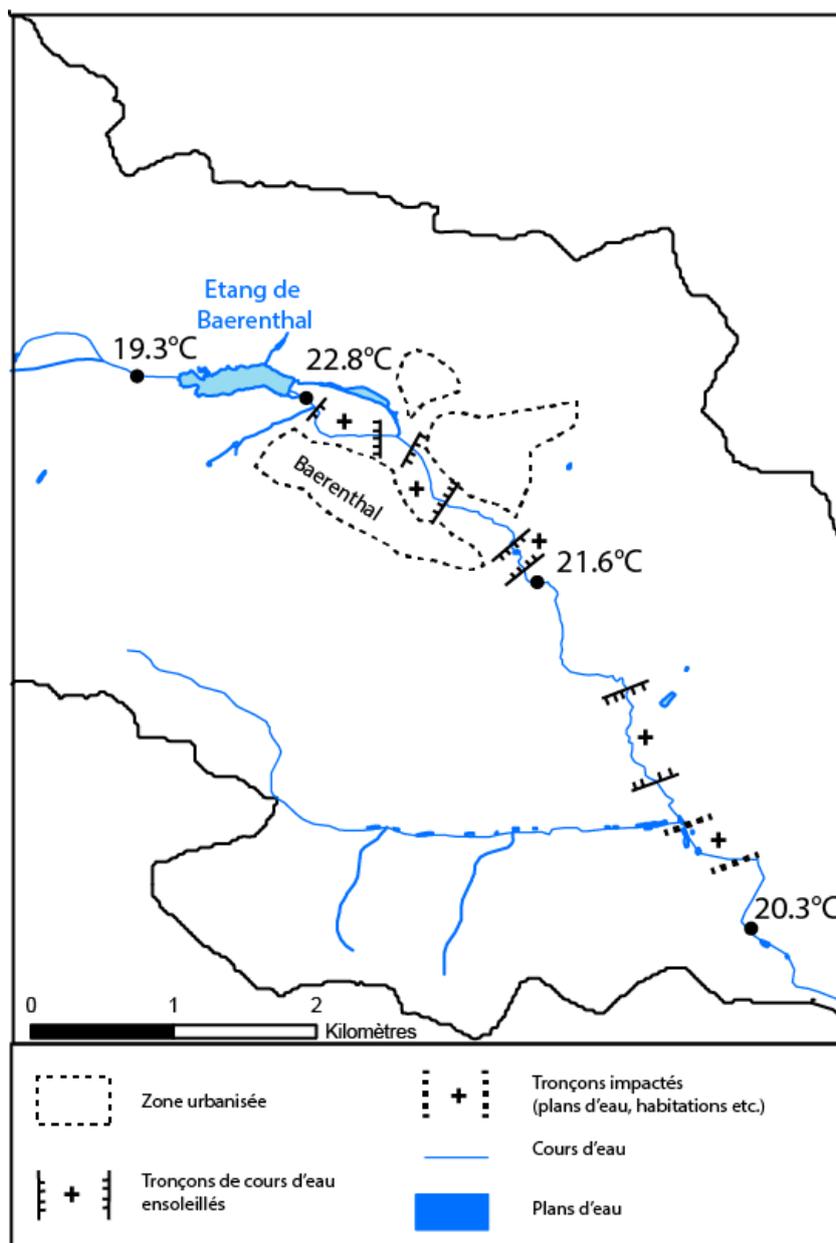


Figure 57: Perturbations du cours d'eau par l'absence de ripisylve ou facteurs anthropiques. Q. Choffel, 2019 (d'après Touchart, 2007)

La récupération thermique du cours d'eau liée à la présence d'étangs est difficile à mesurer car elle dépend du débit et de la présence ou absence d'autres facteurs pouvant apporter ou prélever de la chaleur, comme les sources, l'arrivée d'un tributaire (Touchart, 2007), la présence d'une zone urbanisée (Somers *et al.*, 2013) ou encore les zones sans ripisylve (Bartholow, 2000, Ward, 1985). Cependant elle donne un aperçu de la partie haute des territoires influencés par les grands étangs à l'aval, sur environ 10 km. Ces 10 km sont proches des 7 km mesurés par L. Touchart sur un étang Limousin de 160 000 m³ de volume (Touchart, 2001) ou encore des 9km mesurés au maximum en aval d'un grand étang limousin

(Touchart, 2007). Cette valeur se rapproche également des valeurs de certaines recherches, comme sur le Verdon récupérant 7°C en 9 km (Angelier, 2000). L'influence de l'étang se rapproche aussi d'études sur l'effet d'une coupe de ripisylve, affectant le cours d'eau aval sur 10 km en milieu forestier (Bartholow, 2000).

5.1.2 Une influence thermique à l'aval dépendante des aménagements de sortie d'eau

Bien que l'étude ne porte que sur deux étangs, quelques conclusions sur l'impact d'étangs à fortes capacités volumiques peuvent être avancées en s'appuyant sur certaines similitudes bien marquées, qui font encore mieux ressortir les gradients et les différences. Les deux grands étangs étudiés ont un bilan thermique proche, dans les valeurs annuelles et dans leur dynamique. L'étang de Baerenthal diffère de celui de la Ramade par sa forme plus simple de cuvette homogène ennoyée, avec un volume plus réduit et un débit entrant conséquent. Le débit moyen de la Zinsel du Nord entrant dans l'étang est de 0,54 m³/s pour l'année 2017³⁷. Le temps de rétention des eaux (*Flushing Time*) utilisé pour calculer le temps de renouvellement des eaux d'un réservoir (Geyer *et al.*, 2000, Monsen *et al.*, 2002), soit le ratio du volume du plan d'eau sur le débit entrant, est en moyenne de 3,2 jours pour l'étang de Baerenthal. Ce temps de renouvellement des eaux est relativement court. Il atteint 19,6 jours en moyenne pour l'étang de la Ramade, caractérisé par un été très sec avec très peu d'entrants hydrologiques. Il est un indicateur de capacité du plan d'eau à se stratifier (Scheffer, 1999, Monsen *et al.*, 2002) et donc du type d'influence de l'étang vers son aval. Le temps de rétention donne une information également sur le décalage possible des données thermiques en amont et en aval. Ces différences de temps de rétention entraînent une plus forte capacité à se stratifier pour l'étang de la Ramade, et donc un caractère plus lentique se rapprochant de celui d'un lac de faible profondeur. Pour l'étang de Baerenthal, le faible temps de rétention ne permet pas l'établissement d'une stratification aussi forte et laisse place à des brassages plus fréquents. Ces phénomènes se ressentent sur le cours d'eau aval et sur sa dynamique.

³⁷Données fournies par le Sycoparc Régional des Vosges du Nord dans le cadre du suivi des cours d'eau. Communication d'Alban Cairault.

2.2.4.15 Des écarts majoritairement dans les cycles thermiques

L'étang de Baerenthal est caractérisé par sa sortie d'eau de surface dominant les quelques rejets de fuites de la vanne de fond fermée³⁸. La dynamique du cours d'eau aval suit celle de l'amont, seules les valeurs de température sont modifiées. Durant l'hiver, l'étang refroidit le cours d'eau, tandis qu'il a tendance à le réchauffer de mai à septembre. Sur la période de mars à septembre 2018, l'étang par déversoir le réchauffe en moyenne de 2,4 °C. Pour l'étang de la Ramade, l'écoulement est partagé entre une sortie de fond, par ouverture de vannes et par des fuites importantes, et un déversoir de surface. Le déversoir de surface assure l'écoulement lorsque l'étang a un niveau suffisamment haut, mais deux vannes de fond assurent également un écoulement minimum par fuite d'une vanne³⁹ et afin de préserver un débit minimum biologique. Durant la période estivale, la baisse de niveau de l'étang peut conduire à l'absence d'écoulement par le déversoir de surface, ce qui a été le cas durant le mois d'août 2016. Dans ce cas-là, les sorties de fond assurent la totalité de l'écoulement. La moyenne de réchauffement du cours d'eau sur la période de mars à septembre 2016 est de **1,4°C**, soit exactement 1°C de moins que l'étang de Baerenthal. Cependant, il est important de noter que la mesure pour le second étang est effectuée à 1km à l'aval et non à environ 200 m comme pour l'étang de Baerenthal. Avec une récupération thermique calculée précédemment à 0,6°C/km pour l'étang de Baerenthal, on peut diminuer la valeur de la moyenne à 2,36-0,48 soit **1,9°C** à la même distance que la mesure de la Ramade (Tableau 7).

Tableau 7: Analyses thermiques de la différence amont-aval des étangs de la Ramade et de Baerenthal de mars à septembre

Etangs	Moyenne (°C)	Maximum (°C)	Minimum (°C)
Baerenthal	1,9*	6,5	-5,8
Ramade	1,4	6,5	-4,6

*Données estimées à 1km de distance de l'étang

³⁸Mesurées à 1.8% du débit le 24 juin 2017

³⁹Fuite observée par analyse de terrain et confirmée par le gestionnaire Jean-Pierre Plane. Lors de la période estivale, ces fuites assurent régulièrement un écoulement conséquent entraînant une baisse de niveau de l'étang et donc une absence d'écoulement par surverse.

La légère différence d'influence des deux plans d'eau est dans la dynamique du cours d'eau aval, notamment les cycles journaliers. L'émissaire de l'étang de la Ramade est largement influencé par la dynamique thermique interne à l'étang. On peut apercevoir les phases de stratification thermiques entrecoupées par les brassages dans les écarts entre les cours d'eau amont et l'aval. La capacité thermique de l'étang augmente les températures et surtout les minima. Les alternances de brassage suivant des stratifications importantes apportent des calories au fond. Lors des périodes de conditions atmosphériques fraîches, les calories de fond offrent une inertie importante à l'étang lui permettant de conserver une température élevée, plus élevée que le cours d'eau amont refroidi.

Pour l'étang de Baerenthal, l'hypothèse que la sortie d'eau de surface couplée à un temps de rétention faible ne permet pas de modifier la dynamique du cours d'eau aval. Le cours d'eau à l'aval de l'étang suit la même dynamique, avec des cycles de réchauffement et refroidissement diurnes similaires, mais subit la modification des valeurs de températures chaudes par le réchauffement de l'étang (Figure 58).

Dans le cas de l'étang de la Ramade, le fonctionnement interne de la masse d'eau entraîne des phases de réchauffement lors des stratifications thermiques. La prise d'eau hypostagnique, ou le mélange entre la prise d'eau hypostagnique et épistagnique, entraîne une modification des cycles diurnes de température de l'eau (Figure 59). Pour ces prises d'eau de fond, mi-fond ou mixtes, les amplitudes thermiques diurnes sont réduites (Touchart & Bartout, 2010). Le cours d'eau à l'aval de l'étang à moine ou vanne de fond ne suit plus la même dynamique que celui à l'amont, réduisant les amplitudes diurnes en augmentant à la fois les maxima en certaines périodes mais aussi les minima. A l'inverse, pour les étangs à déversoir et à faible temps de rétention, le cycle diurne est respecté. Les fuites ou les sorties d'eau réduites entraînées par la perte d'étanchéité des vannes de fond peut jouer un rôle également, en fonction de leur débit relatif. Il arrive que les fuites représentent la partie majeure du débit d'eau sortant, le déversoir n'étant plus assuré par le niveau bas du plan d'eau.

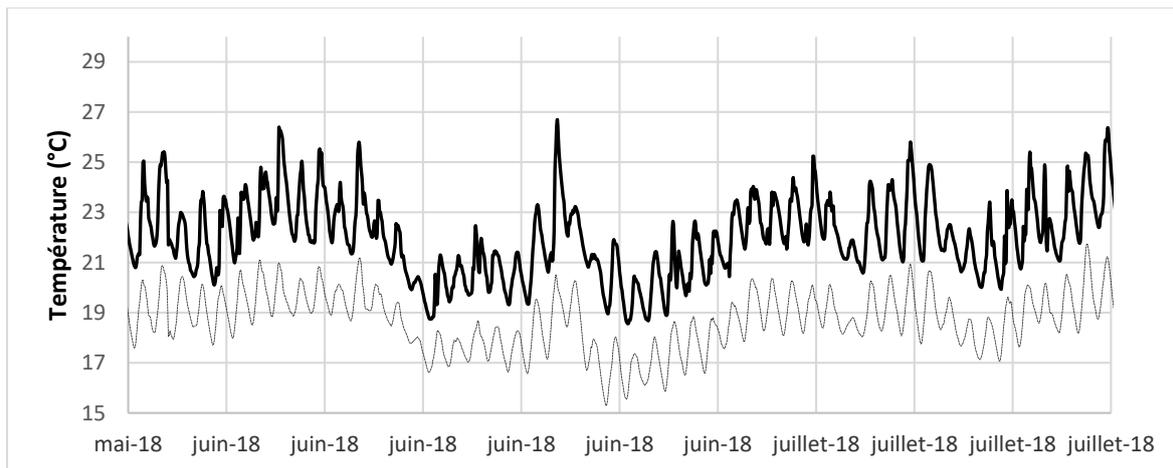


Figure 58: Températures du cours d'eau amont (gris-pointillé) et aval (noir) de l'étang de Baerenthal (sortie par déversoir)

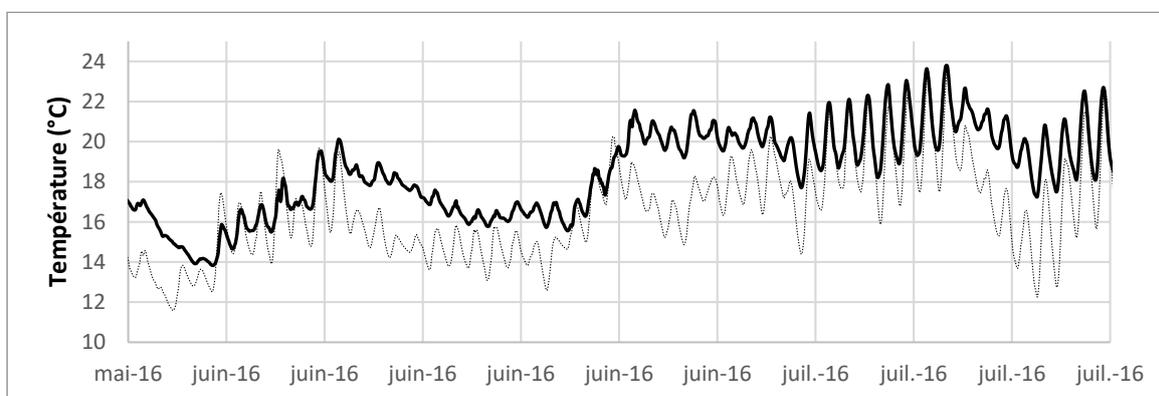


Figure 59: Températures du cours d'eau amont (gris-pointillé) et aval (noir) de l'étang de la Ramade (sortie mixte de fond et surface)

L'influence de l'étang de la Ramade est compliquée par plusieurs éléments. L'arrivée de deux tributaires, et donc la moyenne des deux, peut entraîner des modifications dans le calcul. L'écoulement assez aléatoire des vannes de fond perturbe l'influence thermique de l'étang sur le cours d'eau aval, le rapprochant de l'influence d'étangs à moine (Touchart & Bartout, 2010, Tableau 8). Ce point est rarement pris en compte lors des analyses thermiques. Pourtant, par la difficulté qu'implique la gestion et l'entretien de ces vannes de fond, nombre d'entre elles subissent des défaillances conduisant à des fuites d'eau. Ces fuites peuvent prendre une part conséquente du débit, notamment l'été lorsque la surverse est affaiblie par le niveau bas de l'étang. Elles ont alors une influence particulière sur la température en aval, réduisant les valeurs brutes et notamment les maxima mais augmentant les minima.

Tableau 8: Réchauffement moyen mensuel des deux étangs étudiés

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Baerenthal	-0,27	-0,33	0,08	1,42	2,38	3,19	3,62	3,19	2,01	1,12	-0,53	-0,66
Ramade			0,32	0,88	1,35	1,78	1,91	2,45		0,89	0,47	0,75

Cependant, dans les deux cas, les perturbations des étangs mesurés sont loin des effets des grands lacs de barrage. Les valeurs brutes dépassent rarement les quelques degrés et ce sur les premières centaines de mètres jusqu'à quelques kilomètres au maximum pour les grands étangs. Ces résultats sont proches de ceux obtenus par L. Touchart et P. Bartout (2010) sur les étangs à déversoir du Limousin. Les écarts maximums sont décalés à la fin de l'été, là où le fonctionnement thermique interne de l'étang modifie le cours d'eau aval (Touchart, 2007). On est loin des écarts thermiques de plusieurs dizaines de degrés pour les grands lacs sur plusieurs kilomètres à centaines de kilomètres. Les soutirages hypolimniques des lacs de barrage entraînent de très fortes modifications des cycles thermiques du cours d'eau aval, tandis que celui-ci est moindre pour les étangs et notamment ceux à déversoir de surface. L'analyse thermique nous fournit des informations sur les influences des étangs et le territoire aval concernés, cependant elle ne prend pas en compte les débits, retrouvés dans les notions de calories. Les valeurs maximales de 6°C à 7°C à la sortie des étangs sont proches de l'influence d'un passage du cours d'eau dans une zone urbanisée, le réchauffant rapidement jusqu'à plus de 10°C (Somers *et al.*, 2013).

2.2.4.16 Quel est le bénéfice thermique de la mise en place d'un moine ?

Une réduction du risque de valeurs thermiques élevées

Plus l'étang a une stabilité forte et des phases de stratification thermiques longues, plus la présence d'un moine est rentable par sa réduction du risque thermique brut. C'est lorsque la température de surface est plus chaude que celle de fond que le moine a un intérêt, limitant les valeurs élevées de surface pouvant dépasser les 30°C et donc susceptibles de risque important pour la faune piscicole à l'aval. Pour l'étang de Baerenthal, les phases de stratification sont plutôt courtes, de 5 à 7 jours en moyenne, et les écarts thermiques surface-fond (2 m) sont ponctuellement plus faibles. L'écart maximum mesuré sur les années 2017 et 2018 a été de 9,6°C, pour un écart moyen de 1,9°C sur la période du 1^{er} février au 18

octobre 2018. Sur l'étang de la Ramade, les phases de stratification thermique estivales sont plus longues, allant de 7 à 12 jours en moyenne. L'écart maximal entre la surface et la profondeur de 2m a été mesuré à 14,1°C, avec un écart moyen de 1,6°C du 1^{er} février au 18 octobre 2018.

Pour les deux étangs étudiés, l'écart entre la surface et le fond d'une valeur supérieure à 2°C a été constaté sur 41 % du temps de février à octobre. Sur la période estivale, du 19 juin au 15 septembre, cet écart a duré sur respectivement 51 et 53 % du temps pour les étangs de la Ramade et de Baerenthal. Ces mesures, très proches, montrent le fonctionnement similaire de deux étangs de profondeur moyenne et maximale proches. Sur ce type d'étangs, une prise de fond à un intérêt thermique, réduisant les valeurs de température par au moins 2°C environ 40 % du temps pour des étangs de 2 à 3 m de profondeur maximale. Les 60 % restant, le moine ne s'avère pas efficace dans l'optique de réduire le risque thermique à l'aval. Sur l'étang de Baerenthal, la valeur seuil de 25°C, synonyme de seuil létal pour de nombreuses espèces de Salmonidé, est atteinte ou dépassée pendant 9,7 % (326h) du temps à la surface de juin à octobre, contre 1,7 % (43h) à 1 m et 0 % à 2 m de profondeur.

La prise d'eau de fond ou de mi-fond semble avoir un réel intérêt thermique afin de limiter les valeurs seuils maximales. En revanche, la prise de fond perturbe la dynamique originale du cours d'eau en modifiant les amplitudes diurnes et en augmentant les minima à chaque période de convection forcée. Le soutirage profond lisse les températures avec des amplitudes très faibles à nulles (Figure 60). Cette perturbation du cycle thermique peut avoir des conséquences sur la vie piscicole au même titre que le déversement de températures élevées.

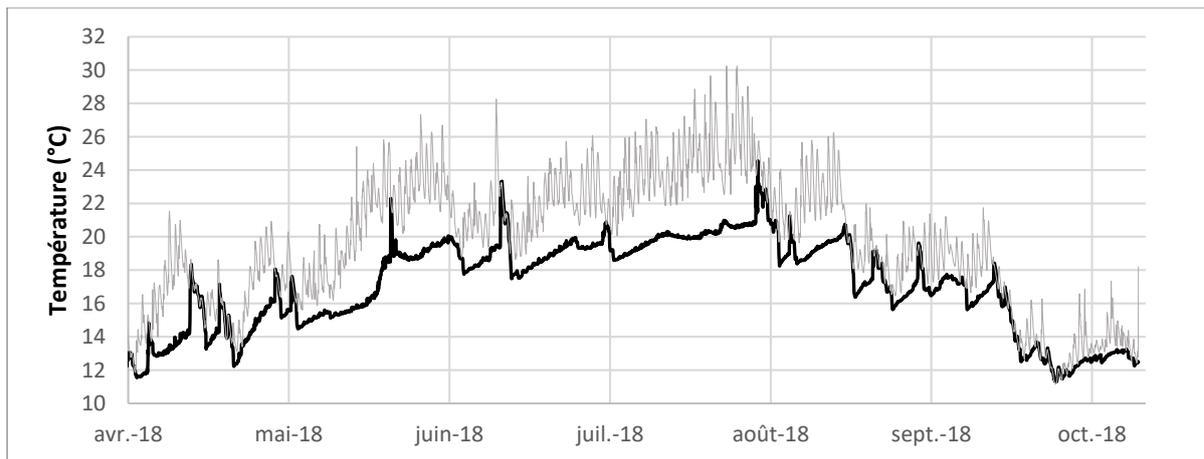


Figure 60: Analyse de l'évolution temporelle de la température à la surface de l'étang (gris), à 2m (noir) et du cours d'eau amont (rouge)

2.2.4.17 Quelles incidences du moine sur l'oxygénation du cours d'eau aval ?

La prise d'eau de fond ou de mi-fond permet de réguler un risque thermique lié aux fortes températures de surface. Il perturbe cependant les cycles thermiques du cours d'eau et peut avoir une incidence sur l'oxygénation des eaux de l'émissaire, essentiel à la vie aquatique. Les eaux de surface des étangs sont fortement oxygénées par leur contact avec l'atmosphère et par la photosynthèse. Lors de phases de stratification thermique, les échanges gazeux entre la surface et les couches en profondeur sont limités. Les couches profondes peuvent rapidement souffrir d'anoxie. Sur l'étang de Baerenthal, les couches de surface ont des teneurs en oxygènes dissous moyen de 7,1 mg/l, avec des maxima à plus de 16 mg/l pendant les fortes stratifications. Ces teneurs en OD diminuent rapidement pour atteindre en moyenne 4,4 mg/l à 1 m de profondeur et 3,7 mg/l à 2 m sur la période de fin juin à mi-octobre. Les teneurs en OD diminuent rapidement dès la mise en place d'une stratification thermique, soit au moment où l'intérêt du moine est maximal. Sur la même période, les couches les plus profondes de l'étang, à 2 m, sont en condition anoxiques pendant 21 % du temps. Ces conditions anoxiques sont retrouvées 8 % du temps à 1m et 1,2% du temps à la surface.

La considération des teneurs en oxygène dissous remet en cause l'intérêt d'un moine dans ce type de plan d'eau. Alors qu'il comporte un intérêt thermique pendant 40 à 50% du temps, le moine est un risque oxymétrique pour la vie piscicole pendant environ 20% du temps estival. Pendant la période de l'année où le moine va comporter un intérêt thermique maximum, ce dernier sera réduit par un risque d'anoxie fort. L'existence d'une chute d'eau ou d'une pente forte du cours d'eau à l'aval est nécessaire lorsque l'on souhaite soutirer de

l'eau de fond ou de mi-fond, afin de réoxygéner les eaux. Dans le cas contraire, le risque d'anoxie à l'aval peut être fort même si l'aléa thermique est réduit, du moins dans ses valeurs maximales.

5.2 Analyse des échanges calorifiques entre systèmes hydrologiques dans l'étude cumulée des étangs

L'analyse traditionnelle des échanges thermiques entre les différents systèmes hydrologiques ne tient pas compte du volume des plans d'eau et des débits des cours d'eau. Or, l'impact thermique dépend du rapport entre le débit du cours d'eau et le volume de l'étang. Plus le rapport est élevé, plus l'impact de l'étang sur la rivière est important (Anquetil, 2018⁴⁰). Le fait de prendre le volume et la température de l'eau, soit le bilan thermique, peut apporter une meilleure connaissance des impacts thermiques des étangs au fil de l'eau. Le régime étant une variable majeure à analyser (Souchon, 1994, Baran, 2007, Poff & Zimmerman, 2010)⁴¹ il est avantageux de le coupler avec la température de l'eau.

5.2.1 Analyse des échanges calorifiques au sein d'un bassin versant

Au sein du bassin versant de la Zinsel du Nord équipé de l'amont vers l'aval, les mesures de débit viennent compléter celles de température. Les ruisseaux de rangs de Strahler de 0 à 2 connaissent de faibles débits, allant de 10 à 45 l/s en période estivale sur les affluents de la Zinsel du nord. A l'aval du bassin versant, le cours d'eau de la Zinsel du Nord est à un rang 3, avec un débit moyen estival d'environ 500 l/s. Sur les affluents ainsi que sur le drain principal, de nombreux étangs sont présents en chaîne, entraînant une influence cumulée sur le cours d'eau. Au niveau des affluents on trouve des petits étangs de 0,05 ha à 1,5 ha de superficie pour une profondeur moyenne oscillant entre 0,2 et 1,5 m. Ces étangs, dont les volumes varient entre 100 m³ et 7 000 m³ sur les têtes de bassin peuvent-ils être comparés aux 165 000 m³ de l'étang de Baerenthal dans leur influence thermique aval ? Quelle influence ont-ils sur le cours d'eau principal ?

⁴⁰4^{ème} RDV du SAGE Mayenne, 16 octobre 2018

⁴¹Cité par Carluier *et al.*, 2016

Les cours d'eau de rang 1 du bassin versant ont des contenances calorifiques moyennes comprises entre $6,9^{E8}$ et $2,8^{E9}$ cal/h entre le Krappenthal au minimum, avec un maximum pour le Breidenbach pour les deux mois de Juillet et Août. Le chenal principal de la Zinsel du Nord, le plus en amont, après la confluence des deux cours d'eau du Krappenthal et de la Bioldmuel, la contenance calorifique est d'environ $1,1^{E9}$ cal/h. A la sortie de l'étang de Mouterhouse et du Breidenbach, la contenance calorifique devient conséquente, le cours d'eau passant d'un rang 2 à un rang 3 de Strahler. A cet endroit, la contenance calorifique moyenne sur l'été atteint les $2,14^{E11}$ cal/h. Le Breidenbach apporte 20 % des calories au cours d'eau de la Zinsel du nord à cet endroit, les 80 % restant proviennent de l'étang de Mouterhouse. Pour un débit similaire, le cours d'eau de la Zinsel possède une température moyenne qui décroît plus en aval, ramenant sa contenance calorifique moyenne à $2,0^{E11}$ à l'entrée de l'étang de Baerenthal. Le cours d'eau, sur les 5 kilomètres de distance, a eu une récupération moyenne d'environ $1,4^{E10}$ cal/h. A la sortie du complexe de deux étangs à sortie d'eau de surface, la contenance calorifique moyenne atteint $3,69^{E11}$ cal/h. Le maximum s'écoulant dans le bras passant par l'étang du Ramstein, avec $3,76^{E11}$ calories, contre $1,48^{E11}$ par la rive droite de l'étang de Baerenthal. Le maximum calorifique est atteint à la sortie de ce complexe de deux étangs sur la commune de Baerenthal. Plus en aval, malgré la présence de seuil, la traversée d'un village et l'arrivée d'un affluent, le cours d'eau récupère progressivement une contenance calorifique plus proche de celle précédant l'influence des étangs de Baerenthal et du Ramstein. Le cours d'eau récupère $2,5^{E10}$ calories sur les 7 km mesurés, soit une moyenne de $3,6^{E9}$ cal/h/km sur le cours d'eau aval. Le maximum de récupération a lieu sur les 2 premiers km, avec une récupération de $1,40^{E10}$ soit 56 % de la récupération totale. L'arrivée de l'affluent du Rehbach, avec une multitude d'étangs sur son linéaire hydrographique, ne représente que 2,6 % des calories de la Zinsel du Nord, bien que les températures mesurées en moyenne estivale soient proches avec $18,8^{\circ}\text{C}$ pour le Rehbach et 20°C environ pour le drain principal (Figure 61).

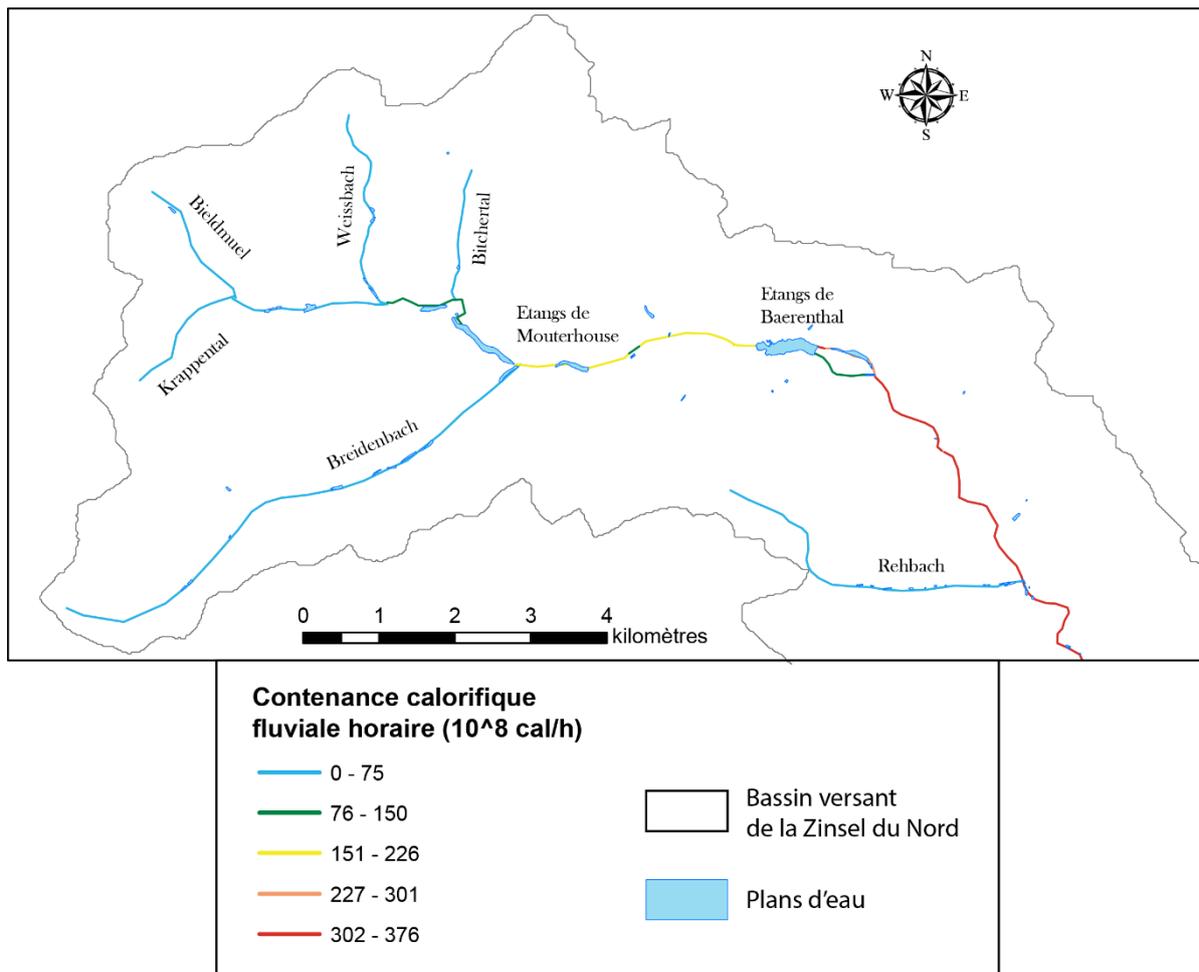


Figure 61: Contenance calorifique des cours d'eau de la Zinsel du Nord et ses affluents (Q. Choffel, 2019)

Les deux complexes d'étangs, à l'amont de la confluence avec le Breidenbach ainsi que le complexe de la commune de Baerenthal modifient la contenance calorifique du cours d'eau de la Zinsel du Nord. Cette modification est due à une augmentation de la température moyenne mais surtout au volume d'eau conséquent déversé à l'aval des grands étangs durant la période estivale (Figure 62). Au niveau de l'étang de Baerenthal, sur les années 2017 et 2018, l'étang apporte une quantité d'eau de 11 l/s supérieure à celle à l'amont. Le maximum d'apport hydrologique de l'étang a lieu au printemps et à l'été, au moment où les débits fluviaux sont les plus bas.

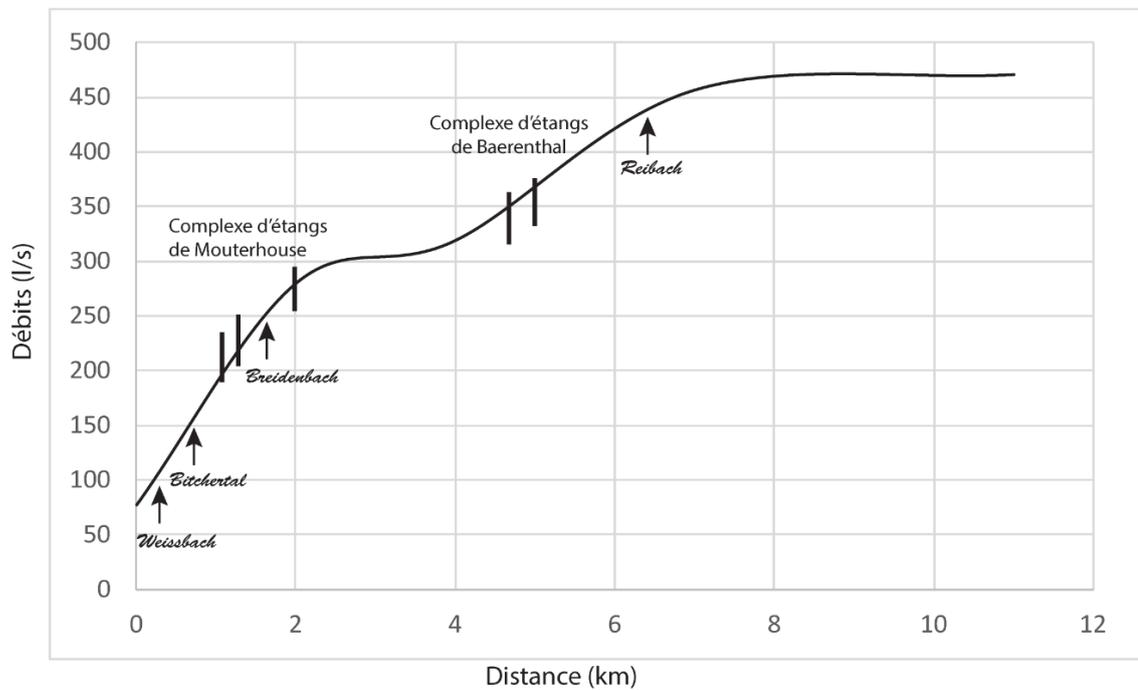


Figure 62: Coupe des débits moyens estivaux de la Zinsel du nord, de la source (confluence Bioldmuel et Krappenthal) à l'aval. Q. Choffel, d'après les données mesurées sur le terrain (F. Donati, A. Cairault) et des modélisations. Q. Choffel, 2019

Au-delà d'une augmentation de la température de l'étang sur le cours d'eau, c'est une modification du bilan thermique qui est le plus perceptible. Les grands étangs ont un bilan calorifique fluvial négatif, soit un gain de calories pour le cours d'eau. Ces calories s'expriment par des augmentations de température mais également de débit. L'effet n'est pas similaire entre les têtes de bassin où les débits sont faibles et sur le drain principal. Sur ce dernier, des changements morphologiques et la présence de grands étangs à fort volume jouent un rôle différent, avec des apports calorifiques conséquents.

5.2.2 L'apport calorifique cumulé des étangs influencé par les volumes d'eau

Le grand étang de 150 000 m³ de Baerenthal a un apport calorifique moyen estival dans le cours d'eau aval de 3,5^{E9} cal/h. La chaîne d'étangs de volume compris entre 100 et 4 000 m³ environ de l'affluent du Reibach entraîne une augmentation de la contenance calorifique estivale moyenne de 5,9^{E8} calories horaires⁴². Ces mêmes calculs amènent à un apport calorifique de 2.6^{E9} cal/h du cours d'eau du Breidenbach, second cours d'eau équipé d'étangs. Les étangs situés sur le cours d'eau du Breidenbach sont plus grands et plus

⁴²L'écart a été calculé entre le débit à l'aval mesuré ainsi que le débit à l'amont estimé à 4L/s, difficilement mesurable et particulièrement variable

profonds que ceux du Rehbach (Tableau 9). Ces étangs apportent un volume d'eau conséquent couplé avec une augmentation de la température par l'abaissement du temps de résidence et l'élargissement de la zone en eau soumise au rayonnement solaire.

Tableau 9: Comparaisons des apports calorifiques au cours d'eau aval d'étangs cumulés sur cours d'eau

Cours d'eau	Nombre d'étangs	Profondeur moyenne (m)	Volumes cumulés estimés (m ³)	Type de sortie d'eau dominant	Ecart thermique amont-aval moyen estival (°C)	Apports calorifiques aval moyen estival (cal/h)
Rehbach	14	0,6	21 000	Moine et Vannes	+2,7	5,9 ^{E8}
Breidenbach	9	1,1	66 000	Moine et déversoirs	+3,3	2,6 ^{E9}
Weissbach	3	1,6	8 000	Moine et déversoirs	+3,4	3,0 ^{E8}
Zinsel du Nord	12	1,4	341 684	Déversoirs	+3,4	2,05 ^{E10}

L'impact cumulé des étangs dépend avant tout du volume total des étangs ainsi que de leur système de sortie d'eau. Après l'étude de quatre bassins versants, dont trois sur rang 1, le volume d'eau semble l'élément déterminant dans l'analyse des impacts cumulés des étangs. Le cumul d'étangs sur la Zinsel du Nord a un impact dissociable de ses petits affluents. Les étangs de la Zinsel du Nord génèrent un écart thermique estival amont-aval proche de ceux du Weissbach et du Breidenbach (+3,4 °C) mais un bilan calorifique estival important de + 2,05^{E10} cal/h. Le volume de l'ensemble des étangs est important, avec plus de 340 000 m³ d'eau et des systèmes de sortie d'eau majoritairement de surverse, favorisant des écarts thermiques bruts importants. Les écarts sont conséquents mais la distance amont-aval l'est également avec environ 8 km entre le point amont, après la confluence de la Bieldmuelh et du Krappental, et le point aval à 2 km de l'étang de Baerenthal. Les trois autres bassins versants étudiés ont des valeurs bien plus réduites, avec des écarts thermiques estivaux moyens calculés entre +2,7 et +3,4°C lors de la période estivale entre l'amont et l'aval. Les écarts de bilan thermiques fluviaux sont liés à la présence de plans d'eau plus volumiques sur le Breidenbach que sur le reste des cours d'eau. En revanche, le nombre d'étangs ne semble pas être un critère déterminant dans l'impact thermique. Le cours d'eau avec le plus grand nombre d'étangs est celui dont l'apport calorifique et l'augmentation thermiques sont

les plus faibles, liés à leur profondeur et volume réduits de ses étangs, ainsi qu'à la présence majoritaire de moines et de vannes de fond.

L'idée que les températures maximales se mesurent dans les zones en amont en lien avec le faible volume d'eau (Smith, 1979) est contrebalancée par d'autres facteurs tels que le temps de rétention de l'eau, la forme du chenal (Webb & Walling, 1986) ou encore l'absence de ripisylve (Ward, 1985). Les zones de faible volume d'eau ont souvent une pente forte permettant un renouvellement rapide des eaux et un brassage important. Les zones à fort volume à l'aval sont plus lentes et soumises à la radiation solaire entraînant un réchauffement ou limitant leur récupération thermique. Naturellement, par l'apport des affluents et l'augmentation du volume d'eau, le cours d'eau augmente sa contenance calorifique de l'amont vers l'aval. La présence d'étangs, de seuil ou autres infrastructures, peut localement amplifier cette augmentation. Les étangs présents sur le cours d'eau augmentent la contenance calorifique estivale à l'aval en réchauffant le cours d'eau mais également en lui apportant une quantité d'eau plus importante. Dans les cours d'eau temporaires ou lors de fortes sécheresses il n'est pas rare de voir que les cours d'eau avec étangs sont les seuls encore alimentés en eau. Là où l'eau se fait de plus en plus rare, les étangs apportent une réserve hydrologique non négligeable bien qu'ils constituent également une réserve calorifique pour le réseau fluvial.

5.2.3 La question de l'installation d'une dérivation peut-elle limiter l'impact calorifique ?

Dans le but de limiter l'impact thermique en aval direct d'un étang, il est souvent préconisé par les administrations d'installer un moine ou une dérivation en lieu et place du simple déversoir de surface (Millot, 2015). Ce dernier est le plus fréquent en étang, bien que certaines régions aient historiquement privilégié le moine pour des questions de vidange. Le moine est plus fortement présent sur les plans d'eau profonds (Bartout & Touchart, 2013).

A partir de nos données de températures et de débit *in situ*, nous allons tenter de modéliser l'effet d'une dérivation sur les deux étangs dont l'installation de ce type de sortie d'eau est souhaitée.

La dérivation consiste à détourner une partie du cours d'eau et ainsi contourner un étang pour préserver les conditions lotiques. Elle assure la continuité écologique et sédimentaire lorsqu'elle est fonctionnelle, mais suffirait-elle à limiter la contenance calorifique à l'aval de l'étang ? Pour les petits étangs en tête de bassin, la dérivation nécessite une arrivée d'eau constante. Dans les périodes de sécheresse, soit lors du maximum d'efficacité thermique théorique de la dérivation, les débits peuvent être trop faibles pour assurer un écoulement dans le canal de dérivation (Millot, 2015). Un nombre conséquent de dérivation sont thermiquement inefficaces du fait de l'absence d'écoulement en période estivale (Touchart & Bartout, 2011, Millot, 2015). En revanche, si celle-ci est bien calibrée peut-elle contribuer à réduire le risque thermique aval ?

Dans le cadre de l'étude de l'étang Baerenthal, la réflexion actuelle est la mise en place d'une dérivation de l'étang avant la confluence avec l'étang de Ramstein. A partir de nos mesures et en modélisant le comportement thermique de l'étang, une dérivation peut-elle apporter des solutions et ainsi limiter la contenance calorifique de la Zinsel du nord dans sa partie aval ?

Le débit constant à l'amont de l'étang de Baerenthal, en parti lié à la présence d'étangs, permet la mise en place d'une dérivation dont la quantité d'eau sera suffisante durant la période estivale. La Zinsel du Nord, de rang 3 au niveau de l'étang, ne connaît pas de débit d'étiage très prononcé. En revanche, la particularité du secteur est la double sortie d'eau de l'étang, dont la majorité du débit sortant se jette dans un autre étang, celui du Ramstein. Dans ce cas particulier, l'efficacité thermique de la dérivation peut être remise en cause.

Le débit moyen de la Zinsel du Nord est de 542 l/s sur les années 2016 à 2018, avec une moyenne estivale estimée à 391 l/s sur l'été. A la sortie du premier étang, 70 % environ du débit s'écoule par surverse vers un canal et le second étang. Il a été mesuré précédemment que le complexe des deux étangs Baerenthal/Ramstein a un impact calorifique moyen de $2,39^{E10}$ cal/h, dont la majorité transite par l'étang du Ramstein. $7,2^{E9}$ cal/h transitent via la rive droite de l'étang avant qu'il soit rejoint à l'aval de l'étang de Ramstein par le canal et ses 1.8^{E10} cal/h en moyenne. Dans un premier temps, la rive droite de l'étang de Baerenthal peut être étudiée comme une dérivation de l'étang du Ramstein. 69 % du débit transite vers le second étang, pour un apport calorifique équivalent à 75 % à la

confluence entre les deux. En d'autres termes, le drain principal de la Zinsel détourné de l'étang du Ramstein permet de limiter de 25 % la contenance calorifique de l'étang, soit une réduction de la contenance calorifique estivale de $1,10^{E9}$ cal/h.

Si l'on estime la mise en place d'une dérivation de l'étang de Baerenthal, le canal d'aménée aurait une température proche de celle à l'amont, à condition qu'il soit dans un secteur ombragé. Pour un débit de 30 % de l'étang dérivé, soit environ 87 l/s en moyenne estivale, la contenance calorifique peut être réduite de $6,0^{E9}$ cal/h en moyenne à la sortie de l'étang de Baerenthal. Cette réduction est cependant perturbée par la présence du second étang bénéficiant du plus grand apport hydrologique et donc calorifique. La contenance calorifique déversée à l'aval des deux étangs, après confluence, serait de $3,48^{E10}$ contre $3,69^{E10}$ à l'heure actuelle, soit une réduction de $2,1^{E8}$ cal/h (Figure 63). Ces conditions nécessitent une répartition similaire entre la sortie droite de l'étang et la partie se déversant dans l'étang du Ramstein. Or, la baisse du niveau d'eau et la pression anthropique liée à la présence d'une plage et d'un camping au niveau du second étang peuvent amener à un déséquilibre hydrologique entre les deux sorties remettant en question la diminution calorifique de la dérivation.

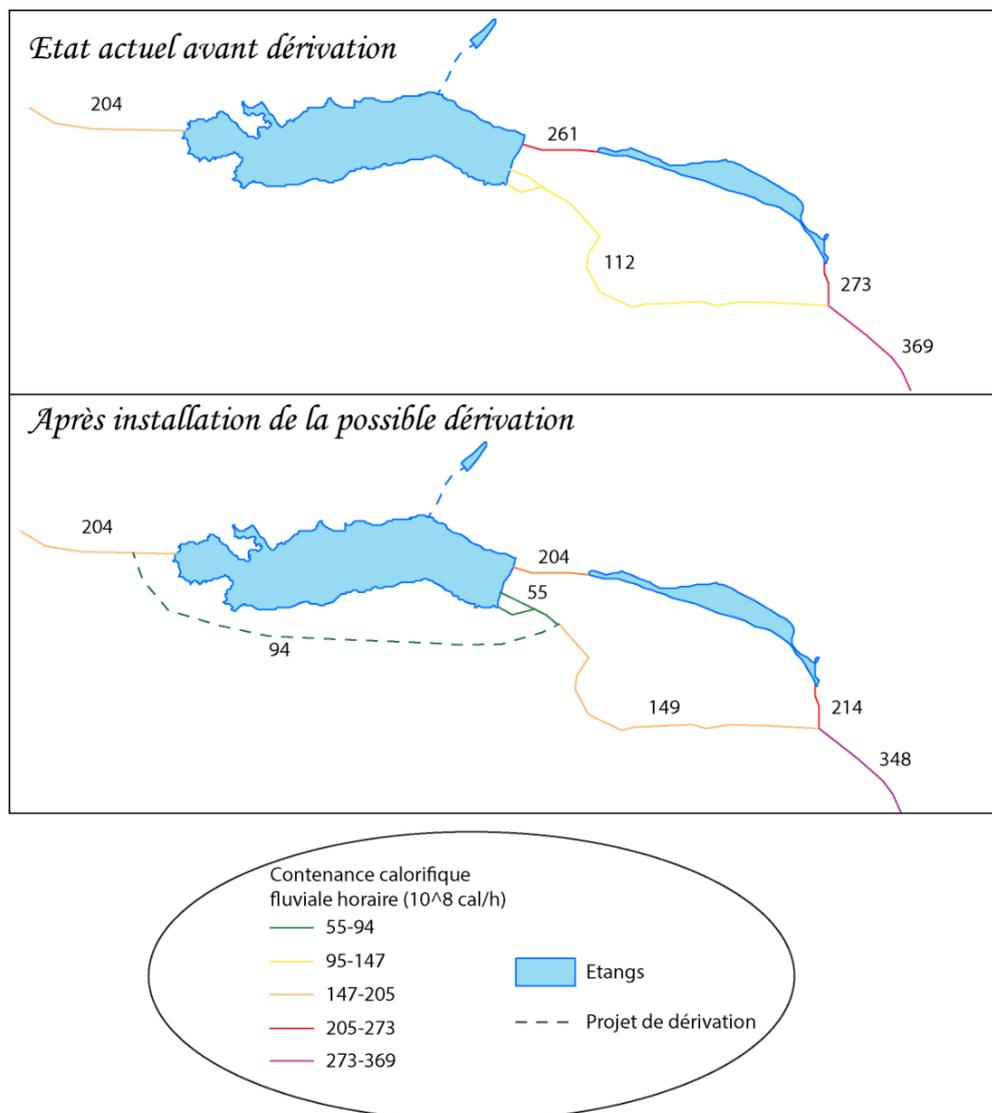


Figure 63: Estimations de la réduction calorifique estivale suite à la mise en place d'une dérivation sur l'étang de Baerenthal (Q. Choffel, 2019)

La présence de l'étang du Ramstein dont l'eau chaude est recherchée⁴³ provoque une diminution de l'effet de la dérivation. La grande majorité du débit sortant du premier étang se jette dans le deuxième, et est donc à nouveau réchauffée. La dérivation apporte des températures plus fraîches à l'aval, mais si elle ne représente qu'une part faible de débit, l'influence sera négligeable. Les 30% de débit dérivés semblent un minimum mais sont-ils réalisables techniquement, financièrement ou encore sans impacter négativement la vie aquatique de l'étang en abaissant son niveau ? La question de la survie de l'étang du

⁴³« C'est paradoxal car on veut de l'eau froide dans le cours d'eau mais de l'eau chaude pour l'étang[du Ramstein] et sa plage, sinon plus personne ne viendra se baigner si l'eau est à 15°C » (réponse du Maire de Baerenthal lors d'une discussion sur la volonté d'implanter un moine ou une dérivation de l'étang de Baerenthal, Février 2017).

Ramstein et de ses activités récréatives, avec la présence d'un camping, est également en jeu si son niveau venait à diminuer de façon conséquente.

La réflexion des échanges thermiques à partir des calories permet d'apporter des réponses lorsque des volumes hydrologiques sont concernés. Les échanges entre le plan d'eau et le cours d'eau en sont un exemple. L'illustration est la dérivation, où les débits ont autant d'importance que la température, nécessitant donc de coupler les deux par l'approche calorifique.

Dans l'analyse traditionnelle de l'impact thermique des plans d'eau, la prise en compte du fonctionnement interne est généralement négligée. Or, elle apporte une connaissance supplémentaire, où les phases de stratification et de brassage sont moteur d'une influence particulière durant l'été. Pour les étangs à déversoir, c'est lors des phases de stratification thermique que l'influence sera maximale, se faisant ressentir plus fortement lors des brassages lorsque l'on soutire une eau de fond de l'étang. La prise en compte du fonctionnement interne de l'étang laisse à penser que la seule étude des température brutes peut ne pas suffire à la compréhension des échanges hydrologiques et thermiques entre l'amont et l'aval. L'utilisation des calories, couplant volume et température, donne une indication supplémentaire, synthétisant le forçage interne et externe à l'étang, et donc son influence calorifique vers son émissaire. La prise en compte des calories sépare considérablement les petits étangs dont l'impact ponctuel brut peut être élevé, mais où l'impact calorifique reste réduit par opposition aux grands plans d'eau profonds. De la même façon que les impacts des étangs sont très différents et loin de ceux des grands barrages, l'impact des petits étangs peu profonds, même situés en cascade sur cours d'eau, ont un effet moindre sur le chevelu hydrographique aval. L'intégration du fonctionnement vertical de l'étang apporte une ouverture à l'étude de l'influence thermique du plan d'eau. L'intégration de la composante spatiale à l'échelle horizontale, soit la zonation de température, peut apporter des indications supplémentaires sur l'effet du forçage externe sur la répartition des calories de l'étang et donc, sur son impact aval.

L'apport de la vision limnocentrée permet une étude complète des échanges calorifiques entre l'étang et le cours d'eau. Afin de compléter cette vision, il conviendra dans le chapitre suivant de centrer l'analyse sur l'étang et les variations de température en son sein.

Chapitre 6 : La représentation thermique des masses d'eau en trois dimensions

6.1 Mise en place d'une méthodologie de mesure de l'hétérogénéité spatiale d'étangs selon leur morphologies et leur environnement

Il est accepté que plus le plan d'eau a une grande superficie, plus la zonation horizontale de la température peut être élevée (Soulignac *et al.*, 2017). L'écart-type de la distribution statistique des températures semble évoluer avec la longueur de la course du vent sur le plan d'eau (Prats & Danis, 2018) et donc, avec la superficie. Ces mesures étant généralement réalisées en lac, seuls les très grands plans d'eau, à l'image du Léman en Europe sont considérés comme capables de développer une hétérogénéité spatiale forte, pouvant dépasser les 6 à 7 °C (Prats & Danis, 2018). En étang, des écarts ponctuels ont été mesurés comme sur l'étang de Rochegaudon (Touchart, 2002) ou sur la gravière de Créteil (Soulignac, 2017, Soulignac *et al.*, 2017) à la limite morphologique avec le lac. Une zonation spatiale de la température est présente en étang et mérite une plus grande attention. Existe-t-il un seuil surfacique pour lequel il ne peut plus y avoir de zonation à cause d'un fetch trop réduit ? Ou d'autres facteurs externes à l'environnement immédiat du plan d'eau peuvent-ils développer une zonation spatiale, même pour les plus petits plans d'eau ?

Pour répondre à ces questions, nous avons adapté des méthodologies particulières pour mesurer ces écarts spatiaux sur trois étangs de 62 à 0,4 ha. Basées sur des mesures en continu et complétées par des analyses ponctuelles, les méthodologies employées permettent de mesurer l'effet du vent, d'une zone d'ombrage ou encore de l'arrivée d'un tributaire sur un plan d'eau.

6.1.1 Cartes de fetch et bathymétrie : indicateurs d'hétérogénéité spatiale des grands étangs (étang de la Ramade)

La course du vent, dénommée fetch par les anglo-saxons, peut être assimilée à la longueur effective du vent au-dessus d'un plan d'eau, bien que L. Hakanson (1981) distingue les deux concepts, l'un étant mesuré dans un cône de variation, l'autre en une seule ligne. Les travaux de Birge, au début du 20^{ème} siècle (Birge, 1909, Birge & Juday, 1914, Birge, 1919), ont permis de mettre en avant le rôle majeur joué par le forçage externe dans la dynamique thermique du plan d'eau. Le vent, par son action mécanique, détermine la répartition des calories dans les plans d'eau (Birge, 1909, 1914, 1919, Wedderburn, 1910, Mortimer, 1952, Dussart, 1966). Son action lutte contre la force de la colonne d'eau à se stratifier, appelée « *work of the wind* » par Birge (1916) et est le principal facteur de répartition spatiale de la température de l'eau des lacs. L'action mécanique du vent est le seul forçage externe capable de transférer des calories depuis les couches superficielles vers les couches profondes. A l'inverse de la convection libre, entraînée par un refroidissement de la couche superficielle au contact de l'atmosphère, la convection forcée est capable d'apporter des calories aux couches les plus profondes. Ce processus est d'autant plus géographique qu'il se localise sur les côtes au vent ou le large, mais peut ne pas agir sur l'ensemble du plan d'eau. Il est nécessaire de ce fait de connaître les zones les plus exposées au vent et celles, au contraire, formant un abri.

Du fait de la friction entre l'eau et l'air, le vent engendre un courant de dérive dans l'eau ainsi qu'un mouvement de vagues à la surface. « *Ces deux processus se développeront proportionnellement à la distance parcourue par le vent au-dessus du lac (course du vent ou fetch). Cette distance est donc un paramètre important.* » (U. Lemmin, 1995). Dans sa thèse de géographie, P. Papon (2007) a étudié la course du vent et leurs conséquences sur les plans d'eau superficiels. Nous nous appuyons sur cette étude et reprenons les éléments développés afin d'analyser l'effet potentiel du vent sur la répartition des calories au sein de la masse d'eau. L'étude du fetch repose sur trois éléments cartographiques, du plus théorique au plus appliqué : le **fetch potentiel continu**, le **fetch effectif** et le **fetch modulé**. Ces trois résultats cartographiques ont été appliqués au grand étang étudié, soit l'étang de la Ramade.

Le **Fetch potentiel** continu est l'interpolation des courses du vent théoriques les plus grandes en chaque point de la matrice à l'intérieur du plan d'eau. Ce calcul ne prend en compte ni les directions du vent, ni même leur fréquence à l'échelle annuelle. Il est en soit très théorique. Il permet cependant d'avoir un aperçu des zones potentiellement les plus exposées aux grandes courses du vent et, à l'inverse, des abris. Ces derniers ne peuvent, effectivement, être affectés par aucune grande course du vent, quelle que soit sa direction. Le **fetch effectif** est la moyenne des courses du vent en intégrant les directions du vent. Il met en avant les zones potentiellement les plus fréquemment balayées par le vent. Le **fetch modulé** intègre les données météorologiques locales afin d'affecter un coefficient aux directions de vent dominantes. Ce dernier fetch est le plus appliqué, prenant en compte directement les zones les plus fréquemment brassées et leur course du vent. Dans la région Limousin, où l'étang de la Ramade est présent, les vents d'ouest sont les plus fréquents. Les grandes courses du vent théoriques, par exemple ceux de la partie nord de l'étang, ne sont que rarement affectées. A l'inverse, la partie centrale, sur le littoral est, est la plus fréquemment affectée par ces vents d'ouest (Figure 64).

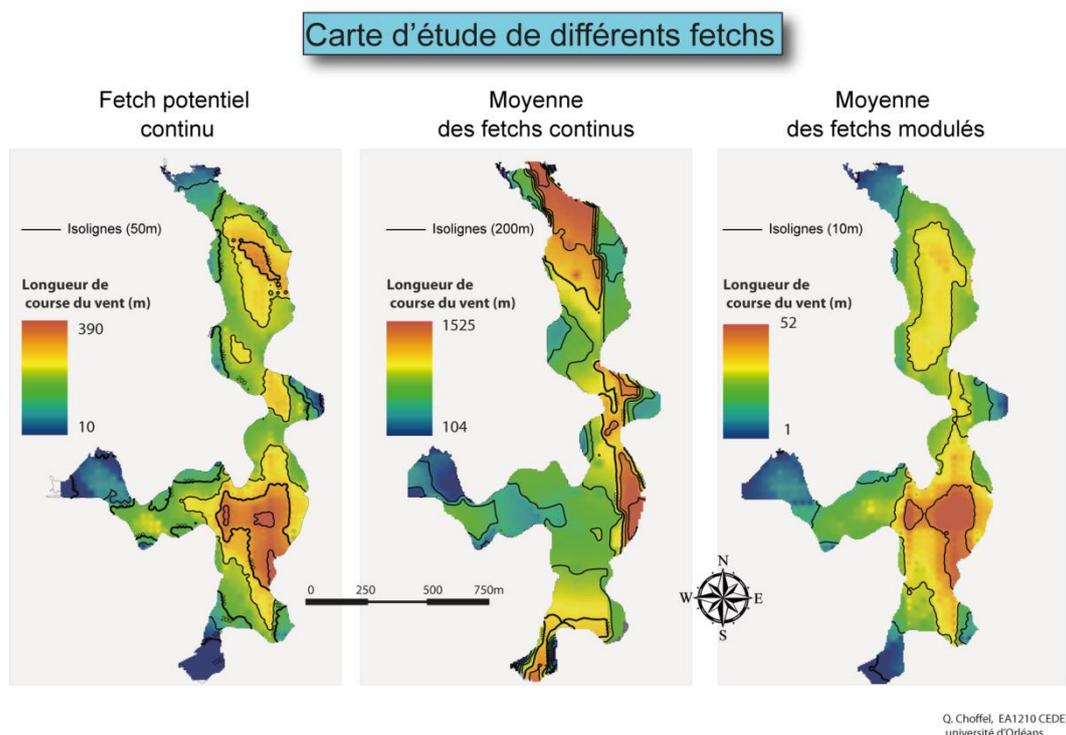


Figure 64: Cartes des fetchs potentiels continu, fetchs continus et modulés sur l'étang de la Ramade (Q. Choffel, 2016)

L'étude de la course du vent est le premier élément d'analyse de la disparité spatiale de l'action mécanique s'exerçant sur le plan d'eau. Pour notre étude, nous nous sommes appuyés sur ces cartes afin d'établir les premières hypothèses de localisation des différentes chaînes de thermomètres sur l'étang.

Les cartes de fetch mettent en évidence des zones homogènes sur lesquelles nous nous appuyerons pour délimiter nos « bassins ». L'objectif de délimitation des bassins est d'obtenir des zones possiblement homogènes, représentées par une chaîne de thermomètres. Les données thermiques obtenues en chaque chaîne se doivent d'être les plus représentatives du bassin choisi. De ce fait, la course du vent et la bathymétrie nous ont semblé les plus appropriées pour obtenir la plus grande représentativité des mesures thermiques *in situ*. Pour des étangs comme celui de la Ramade, la bathymétrie à elle seule ne semble pas suffire à exprimer un découpage en bassins le plus homogène possible. Le couplage avec les cartes de fetch pour un étang fortement disséqué et à morphologie complexe semble plus approprié (Figure 65).

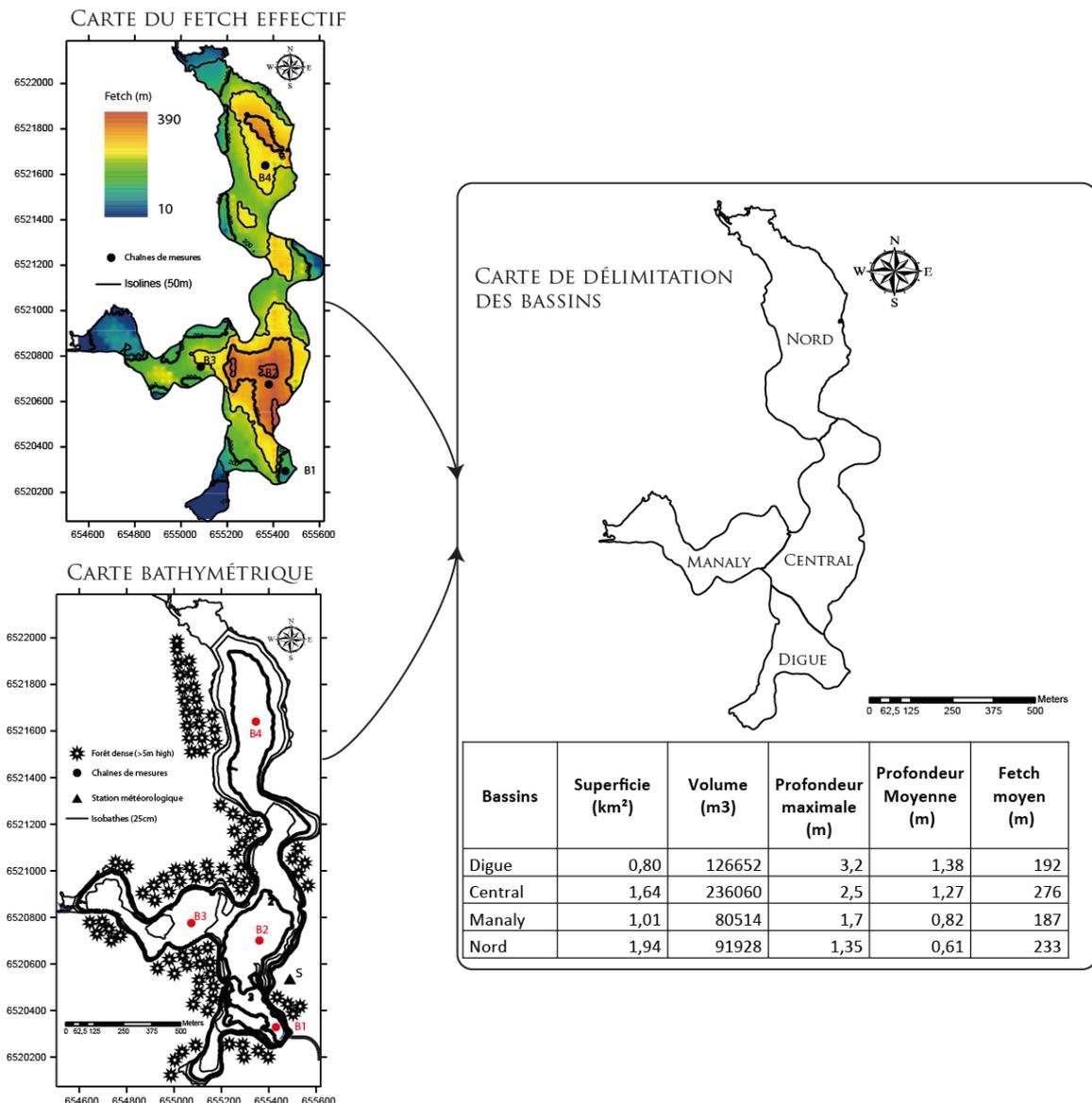


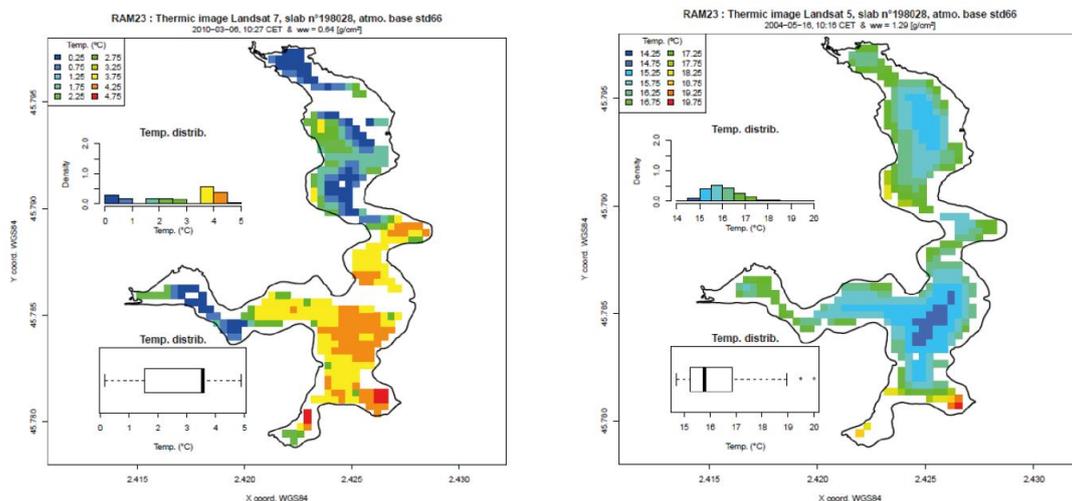
Figure 65: Méthodologie de création des bassins étudiés dans un grand étang multilobé (étang de la Ramade)

Quatre bassins ont été délimités afin de tenter de mesurer la répartition spatiale des calories au sein des étangs. Le choix du nombre de bassins a été limité pour des raisons matérielles, les fonds de baie ayant été étudiés sur des périodes courtes car ils semblaient également offrir une certaine autonomie de fonctionnement. Le plus grand questionnement porte sur l'effet thermique possible du littoral. Dans ce grand étang de la Ramade, peu profond, l'analyse de la dynamique thermique du littoral a été mise de côté. Le choix s'est porté vers les zones plus profondes, dont le volume est suffisant pour permettre une comparaison. Le bilan thermique prenant en compte le volume et la température, la modification liée à la prise en compte des données littorales sera faible, même si les écarts thermiques peuvent être grands. Les zones végétalisées de queue d'étang, à intermédiaires

entre la zone régulièrement ennoyée et le milieu aquatique à proprement parlé, n'ont pas été instrumentalisées. Ces espaces peuvent être conséquents sur certains étangs et apporter une modification énergétique non négligeable, liée à la présence de végétation et à la faible hauteur d'eau (Brunaud, 2007). Des écarts thermiques entre les zones végétalisées et le large sont parfois considérables et la dynamique thermique peut y être modifiée. Cependant, la faible superficie des zones concernées par rapport à l'étang, dans notre cas, ne permet pas un apport direct à l'analyse de la variation spatiale du bilan thermique. Il serait intéressant de mesurer le bilan thermique de ces espaces de transition, dans la continuité de cette étude, pour des étangs où la végétation occupe une grande superficie.

L'analyse de données thermiques à partir d'images satellites est utile afin de mesurer les zones de répartition de la température selon une représentation continue. Les bassins délimités ont été corrélés aux données issues de 19 cartes de température de surface de l'étang sur l'année 2016 afin de confirmer le choix cohérent de l'étude principale des quatre bassins (Figure 66).

Images satellites Landsat 7 de l'étang de la Ramade, les 6 mars 2010 et 16 mai 2004



Source: Pierre-Alain Danis, 19 avril 2016. Onema

Figure 66: Image satellite de l'étang de la Ramade. Analyse thermique de surface. Pierre-Alain Danis, pôle plan d'eau AFB-IRSTEA, Aix en Provence, 19 avril 2016

L'objectif de cette étude est de mesurer des écarts thermiques au sein des masses d'eau représentant les différents bassins. Les études sur les écarts thermiques entre bassins via l'analyse du bilan thermique sont rares (Wang *et al.*, 2014). Les premiers résultats mettent

en avant des variations spatiales non négligeables au sein du plan d'eau (Wedderburn, 1907, Abbasi *et al.*, 2016, Brunaud, 2007, Coates & Folkard, 2009). Sur les grands plans d'eau de morphologie complexe, avec la présence de baies plus isolées ou de bassins à bathymétrie variée, les écarts de températures entraînent-ils des écarts de fonctionnement du plan d'eau ? Est-ce que les bassins plus ou moins isolés ont un fonctionnement autonome par rapport au cœur volumique de la masse d'eau ? Ou fonctionnent-ils comme le reste de l'étang avec quelques particularités dans les données thermiques brutes ?

6.1.2 L'effet de la végétation et de la topographie locale sur les petits étangs (étang de Rilhac)

Les variations de températures au sein d'un lac ou de grands étangs sont régies par l'action du vent. Pour les très grands lacs, des variations climatiques entre plusieurs parties du lac induisent des écarts thermiques pouvant être conséquents. A l'inverse, les très petits étangs créent une mosaïque de pièces d'eau sur le territoire français. Malgré leur petite taille, ces plans d'eau suivent une dynamique de stratification thermique semblable aux plans d'eau polymictiques lorsqu'ils dépassent les quelques mètres de profondeur (Touchart, 2001, 2002, 2007, Folkard *et al.*, 2007, Abbasi *et al.*, 2016). L'action mécanique apportée par le vent est réduite par le fetch lui-même très faible. Les facteurs externes de modification de la température de la colonne d'eau ont une action plus locale. Certaines études spatiales montrent l'effet réducteur de la végétation environnante et la topographie locale sur le fetch du lac. Markfort et son équipe (2010) ont étudié la perturbation de l'action du vent par la végétation et la topographie locale sur un petit lac de forme arrondie (Round Lake, Minnesota, USA) quand d'autres études se sont focalisées sur les écarts thermiques entre plusieurs lacs sous l'effet local de la déforestation (Steedman *et al.*, 1998). Une grande partie du lac n'est pas affectée par le vent, tandis qu'il reprend son action sur les 200 m qui l'éloignent du littoral. La végétation haute, ainsi que la topographie locale (présence d'une butte ou encaissement du plan d'eau dans un fond de vallée) ont un effet direct sur les petits plans d'eau. L'hypothèse réside dans l'effet de ces facteurs locaux sur la répartition de chaleur au sein de ces étangs. La question s'est alors posée pour nos petits étangs français qui ornent le paysage bocager et les fonds de vallons de nombreuses régions. Jusqu'où est-il possible

d'avoir une variation thermique horizontale sur les petits plans d'eau ? Les plans d'eau de moins de 1 ha sont-ils particulièrement homogènes, puisque le vent ne peut agir pour disperser les calories ?

Nos regards se sont tournés vers un petit étang en zone agricole dans la périphérie de Limoges, sur la commune de Rilhac-Rancon (Haute-Vienne). A proximité de l'étang s'élève une petite butte végétalisée par une forêt de conifères, sur le flanc ouest (Figure 67). Ce bois, au même titre que la haute ripisylve du Round Lake, peut avoir une influence directe sur l'étang par réduction de la force mécanique du vent mais également par effet d'ombrage. Sur cet étang de moins de 500 m², trois chaînes de thermomètres enregistreurs ont été placées. La première est située à proximité de la forêt, sur la partie ouest de l'étang, soit la partie ombragée, à une profondeur maximale d'environ 3 m. La seconde a été placée à une profondeur similaire mais dans une zone non influencée par la présence de la végétation. Les deux bouées sont distantes d'environ 40 m. Le choix de la profondeur maximale identique permet de se dispenser de la probable influence de la bathymétrie sur la température et la stabilité de la zone concernée. Enfin, une troisième bouée a été installée au point le plus profond de l'étang pour analyser le bilan thermique du plan d'eau dans sa méthodologie classique (Figure 67).

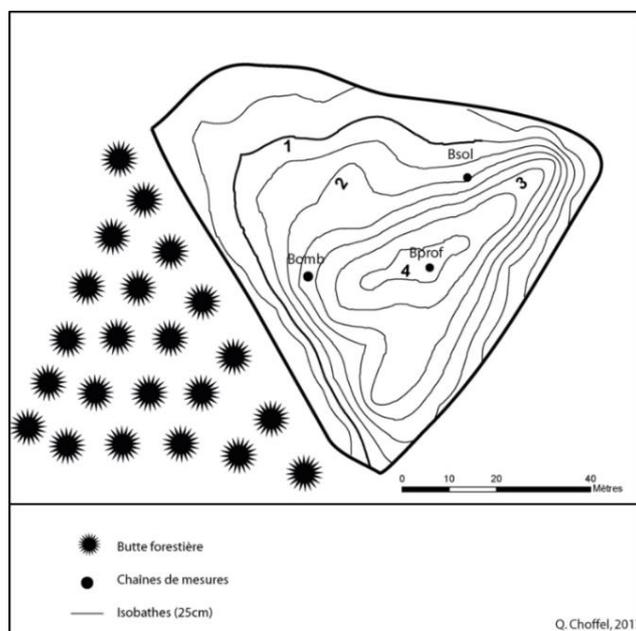


Figure 67: Carte bathymétrique de l'étang de Rilhac. Réalisation : Q. Choffel, campagne de mesures 2017, Choffel Q. et Al Domany M., Q. Choffel, 2018

Les caractéristiques morphologiques des trois étangs sont proches, permettant de bloquer cette variable capable d’influencer la dynamique thermique (Tableau 10).

Tableau 10: Caractéristiques morphologiques des bassins délimités dans l'étang de Rilhac

Bassins	Volume (m ³)	Profondeur maximale (m)	Profondeur moyenne (m)	Superficie (m ²)
Profond	5868	4,26	2,16	2705
Ombre	2604	4,11	1,73	1503
Soleil	2376	4,04	1,51	1583

Nous partons de l'hypothèse principale de l'influence de la présence d'une zone ombragée sur la répartition de chaleur d'un petit étang. La quasi absence de fetch ne permet pas une homogénéisation de la température et laisserait alors à l'ombrage prendre effet sur une partie de l'étang.

6.1.3 Les mesures du bilan thermique comme synthèse des échanges cours d'eau/ plan d'eau (étang de Baerenthal)

Dans cette étude, il a été choisi de travailler sur le suivi thermique de l'ensemble du bassin versant d'un cours d'eau avec présence d'étangs. Dans une vision limnosystémique où l'étang est au cœur des échanges avec le cours d'eau, soit un amont récepteur et un aval moteur, l'étude du bilan thermique prend tout son sens. La seule température, sans la prise en compte des volumes, est réductrice, notamment lors de la présence d'échanges entre divers cours d'eau et plans d'eau. La prise en compte du fonctionnement interne de l'étang dans les échanges calorifiques permet une compréhension de l'effet moteur de l'étang sur le milieu récepteur (Touchart, 2016). L'approche limnocentrée est également un moyen de mesurer l'effet de l'entrée d'un tributaire dans l'étang. Cet effet est-il localisé dans la queue de l'étang ou est-il perceptible sur l'ensemble de la masse d'eau ?

La méthodologie de mesure du bilan thermique au sein d'un bassin versant a été centrée sur l'étang de Baerenthal. Des thermomètres enregistreurs ont été installés dans les cours d'eau de tête de bassin, le long du linéaire de la Zinsel du Nord, ainsi qu'à l'aval de

l'étang de Baerenthal. Au sein de l'étang étudié, des chaînes de thermomètres ont été installées en 5 localisations. La méthodologie a été mise en place selon un double objectif, celui du suivi du cours d'eau au sein de l'étang, soit une chaîne en amont, à l'entrée du cours d'eau, une au centre et dans un deuxième temps, celui de l'influence des sorties d'eau sur l'étang avec trois bouées aux différentes sorties d'eau (Figure 68). Les trois bouées localisées au niveau de la chaussée permettent de mesurer l'influence possible d'une sortie d'eau de fond ou par déversoir sur le réseau hydrographique, en prenant la température à la profondeur de sortie d'eau, mais également au sein de l'étang. Une des hypothèses réside dans l'influence de la sortie d'eau sur la structure thermique de l'étang. Sa taille impactant le débit sortant et sa profondeur de prise d'eau peuvent influencer la structure thermique d'un plan d'eau (Casamitjana *et al.*, 2003). Ici, une sortie d'eau large par déversoir, une sortie d'eau de fond au centre et un petit déversoir en rive droite peuvent apporter des éléments de réponse en limnologie fondamentale par la perturbation possible de la stabilité du plan d'eau, et en limnologie appliquée par les moyens de gestions appropriés.

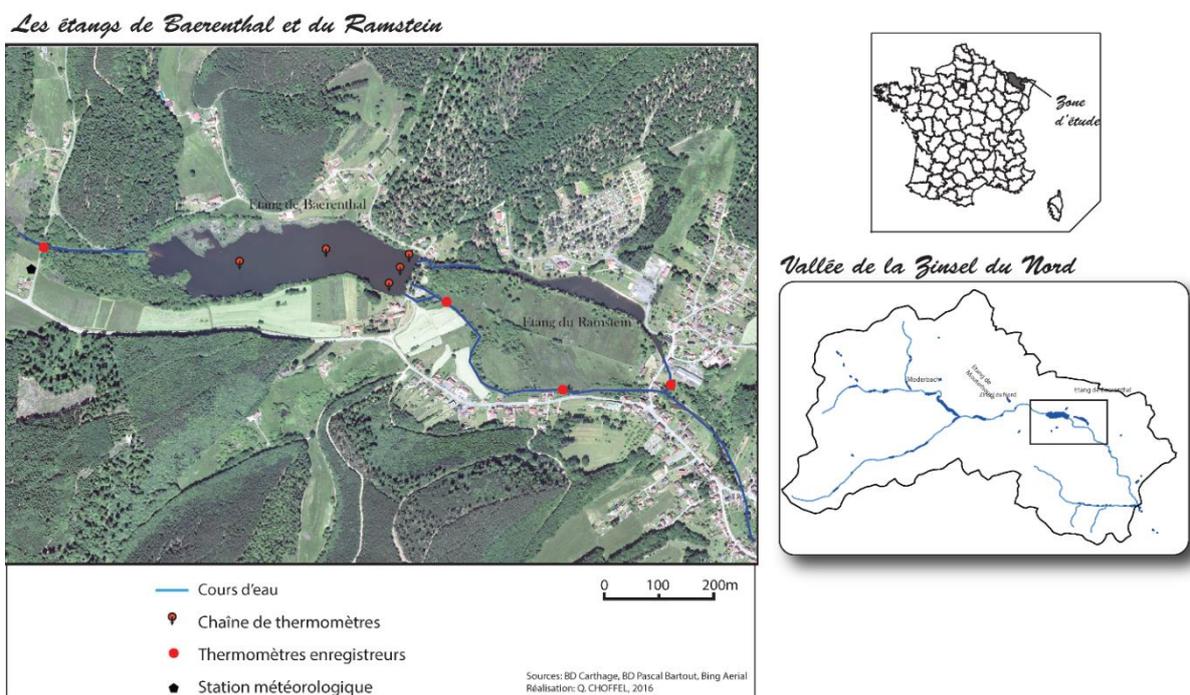


Figure 68: Cartes de localisation des chaînes de thermomètres enregistreurs sur l'étang de Baerenthal. Q. Choffel, 2019

La méthodologie de mesure de la variation spatiale a été adaptée à chaque étang selon les hypothèses de travail et le résultat attendu. Les bouées de mesure ont été placées en

fonction du type d'étang et des forçages externes agissant sur la masse d'eau. En effet, la prise en compte des volumes dans les mesures thermiques nous oblige à nous focaliser uniquement sur les paramètres pouvant affecter une part conséquente de l'étang. Pour les grands étangs, l'hypothèse de l'action du vent a été privilégiée, alors que c'est l'effet d'ombrage qui a été choisi pour les plus petits étangs, et l'arrivée d'un tributaire pour celui où le temps de séjour est le plus court. Les résultats obtenus à l'aide de cette méthodologie pourront tout de même être extrapolés aux autres plans d'eau dont les morphologies ou l'environnement immédiat offrent des possibilités d'hétérogénéité thermique de leurs masses d'eau.

6.2 Une géographie du fonctionnement thermique des plans d'eau dépendante de leur morphologie?

Alors que les cours d'eau développent de faibles variations spatiales de leur température, la largeur des plans d'eau permet la création d'une hétérogénéité spatiale (Touchart, 2002, Soullignac *et al.*, 2016, Abbasi *et al.*, 2016), les plans d'eau, comprenant les lacs et les étangs, ont une capacité à créer cette hétérogénéité soumise par l'action mécanique du vent, par l'environnement direct lié à la présence d'abris ou par des perturbations hydrologiques.

Les écarts thermiques zonaux sont les plus forts pour un grand étang sous l'influence du vent, alors qu'ils sont les plus réguliers et localisés lorsque l'effet d'ombrage agit sur un très petit étang, ou lorsque les apports hydrologiques perturbent la structure thermique de l'étang.

6.2.1 Les grands étangs multilobés propices à la variation spatiale de température

En Limousin, les grands étangs et lacs de barrages ennoient des alvéoles fermés par des cloisons, propices à la construction de barrages, à l'image des lacs de Saint Pardoux et Vassivière. Les étangs sont festonnés ou multilobés lorsqu'ils ennoient plusieurs alvéoles, et de profondeur relative assez faible, proche des 1 m de profondeur moyenne. Cette morphologie particulière de plans d'eau multilobés renforce l'hypothèse de développement d'une hétérogénéité spatiale de la température de l'eau. Les bassins sont séparés par des passages étroits, limitant les effets du fetch et les échanges hydrologiques et donc

calorifiques. L'hypothèse première réside dans une possible autonomie d'évolution thermique de ces bassins face à la zone centrale de l'étang. Par leur faible profondeur et leurs caractéristiques propres de fetch, morphologie et effets d'abris, les bassins d'un étang multilobé peuvent différer dans leur fonctionnement thermique.

L'étang de la Ramade est un étang multilobé ayant ennoyé deux alvéoles, à l'intersection entre deux cours d'eau, celui de la Ramade (nord) et le cours d'eau de la Quérade (ouest). Les deux alvéoles, au nord et au centre de l'étang, se joignent le long d'une cloison étroite de quelques dizaines de mètres au centre de l'étang. L'alvéole principal, à proximité de la digue, est la zone en eau majeure de l'étang, avec une profondeur maximale de plus de 2m, contre environ 1,25 m pour l'alvéole au nord.

Les écarts thermiques moyens à la surface entre les zones mesurées sont semblables. Sur la période estivale, la moyenne des quatre points d'études sur les années mesurées diffère au maximum de 0,8°C entre le point dans le bassin au nord et celui à la chaussée de l'étang de la Ramade. Le point le plus chaud, à la digue, est en moyenne à 22,4 °C à la surface, entre le 1^{er} juin et le 31 août des années 2016 à 2018. A l'extrémité inverse, la valeur mesurée au point B4 est de 21,9 °C en moyenne. La partie centrale et la partie ouest sont proches, avec respectivement 22,3°C et 22,4 °C. La moyenne interannuelle des trois mois les plus chauds est un bon exemple de variation spatiale de la température de surface, et correspond à la tendance globale observée à partir des autres données. Certaines moyennes mensuelles ont des écarts significatifs moyennes de plus 1°C, avec 1, 2°C d'écart pour le mois de juin 2017, entre un sud de l'étang à 23,4 °C de moyenne, et le nord à 22,2 °C. Des écarts de températures de surface moyenne de plus de 1°C sont significatifs et expriment une certaine hétérogénéité spatiale de la température de surface du plan d'eau. Cette hétérogénéité est ponctuellement forte, avec des écarts thermiques journaliers conséquents pouvant aller jusqu'à 11 °C mesurés entre le nord et le sud de l'étang.

L'influence du vent diffère selon la structure thermique, soit si le plan d'eau est en condition d'homothermie ou de stratification. La direction du vent, sa force et la structure thermique initiale sont les trois facteurs déterminant la répartition de chaleur dans l'étang.

6.2.1.1 Etudes de l'influence du vent sur une structure thermique stratifiée

Afin de mesurer le forçage mécanique sur une colonne d'eau stagnante stratifiée, les journées du 3 et 8 août 2016 ont été choisies comme référence de journée estivale ensoleillée, chaude et peu ventée. L'analyse permet d'étudier les échanges de chaleur entre les différents bassins du plan d'eau en fonction des conditions météorologiques. Les deux journées choisies peuvent être considérées comme des journées anticycloniques estivales subissant l'influence des deux vents dominants : sud-ouest pour la journée du 3 août et nord-ouest pour celle du 8 août. Lors de ces deux journées, la colonne d'eau de l'étang est stratifiée directement.

Journée du 8 août 2016: effet d'un vent de nord-ouest sur l'étang en période estivale

Les conditions météorologiques du 8 août 2016 sont sous l'influence d'un vent léger de nord-ouest soufflant au-dessus de l'étang stratifié de la Ramade, avec un maximum de 1,3 m/s entre 14 et 17h. La température maximale de l'air est de 25,6 °C à 14h, avec une humidité relative inférieure à 50 %. Par son orientation, la zone profonde de la Ramade est exposée aux vents de nord-ouest, offrant une course sur l'eau importante. Le vent, bien qu'assez faible, va modifier la structure thermique du plan d'eau, entre des zones abritées au nord et à l'ouest liées à un fetch réduit et à la présence d'une forêt rivulaire dense, et les zones les plus exposées dans sa partie centrale et au sud-est, là où l'étang connaît ses plus grandes profondeurs.

Les eaux chaudes de surface sont lentement poussées vers la chaussée, dépassant les 26 °C au point de mesure. A la côte sous le vent, ces eaux chaudes de surface sont remplacées par des eaux de fond plus froides. C'est un refroidissement progressif à la surface qui s'opère sur les secteurs ouest et, dans un moindre degré, au nord. Ces zones perdent plusieurs degrés pour atteindre 23,1 °C en surface à l'ouest et 23,6 °C au nord, à 16h. Les eaux chaudes de surface sont concentrées vers la chaussée où elles vont plonger en profondeur, jusqu'à environ 1,5 m, abaissant la thermocline dans la partie profonde. A 1 m de profondeur, la température à B1, à la chaussée, est de 24,2°C. Cette température à 1 m à la chaussée est plus élevée que la température de surface au niveau des bassins à l'ouest (B3) et au nord (B4). Au centre de l'étang se crée la ligne de partage de chaleur entre les différentes parties du lac. La température y oscille entre 24,3 °C à la surface et 20,7 °C au fond (Figure 69, A).

Pour les plans d'eau polymictiques, la faible profondeur et la faiblesse de la stratification, comparées aux lacs profonds, permettent une forte variabilité de la structure thermique. L'action du vent, même modérée, entraîne l'approfondissement de l'épistagnion à la côte au vent, et à l'inverse son rétrécissement à la côte sous le vent, jusqu'à une possible homothermie. Lorsque le vent est fort, il peut brasser l'ensemble de la colonne d'eau réduite à quelques centimètres jusqu'à quelques mètres au maximum. Lorsque celui-ci est modéré, il entraîne une variation spatiale de la structure thermique du lac, renforçant la stratification thermique à la côte sous le vent tout en la fragilisant sur sa façade opposée. Le 8 août à 16h, la stratification thermique à la chaussée (B1) est renforcée par l'action mécanique éolienne. Les écarts entre la surface et le fond (à 2,5 m) sont de 6,1 °C, avec une thermocline à 1,25 m environ (Figure 69, B). Au point central de l'étang, le profil n'est que peu changé. La température de surface est légèrement plus faible, tandis que celle de fond (2 m) est proche de la température à la chaussée, avec un écart entre la surface et le fond de 4,1°C. La côte sous le vent a une stratification thermique fragilisée par l'effet d'upwelling. La température de surface basse se rapproche de celle du fond du lac, à 20,7 °C en B3 (ouest). L'écart thermique n'est plus que de 2,4°C. Avec des eaux de surfaces un peu plus chaudes et une température de fond de 20,8°C, la stratification thermique au bassin nord est également fragilisée.

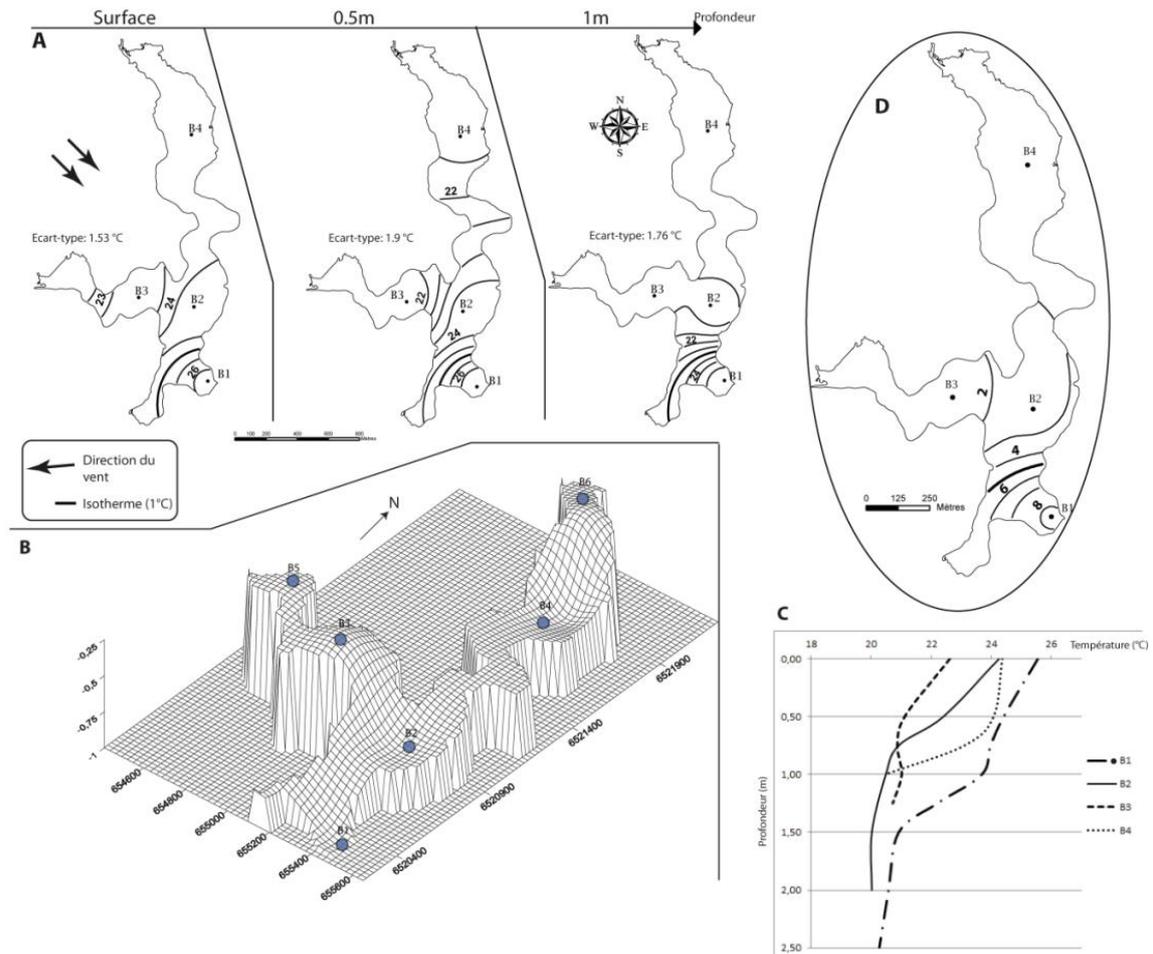


Figure 69: Dynamique thermique de l'étang de la Ramade le 8 août 2016 à 18h. Cartographie de la température (A), vue 2D1/2 de la position de la thermocline (B), profils thermiques (C), cartographie de la vitesse du vent nécessaire au brassage de la masse d'eau (m/s). Choffel et al., 2018

Les zones sous le vent ont une stratification thermique affaiblie se rapprochant d'une homothermie. En prenant en compte le nombre de Wedderburn modifié par Touchart *et al.* (2014), on peut mesurer de manière théorique la vitesse du vent nécessaire pour que l'action mécanique vienne détruire la stratification thermique. Il suffit d'un vent de 2 m/s (soit 0,7 m/s supérieur à l'actuel) pour que la partie sous le vent puisse être brassée et devienne homotherme. Sur la façade opposée, à la chaussée, il faut un vent 4 fois supérieur (à 8 m/s) pour que la force éolienne dépasse la force de densité de la structure thermique (Figure 69, C).

La spatialisation de Wedderburn modifiée montre la capacité du plan d'eau à résister à la convection forcée. En surface comme en profondeur, l'étang connaît des variations spatiales importantes, sans nécessairement faire face à des conditions météorologiques extrêmes. Le faible volume ne permet pas une régulation de la diffusion de calories et

entraîne donc des variations spatiales fortes (Delebecque, 1896), probablement plus importantes qu'en lac. La thermocline connaît des oscillations dans sa composante verticale, au sein de la colonne d'eau, ainsi que dans l'aspect horizontal. La profondeur de la thermocline, caractérisée par le plan de plus forte variation de température de la colonne d'eau, oscille entre une 1,5 m et 0,5 m au sein de l'étang de la Ramade le 8 août 2016 à 18h (Figure 70, A). Elle est la plus basse dans la zone au vent, soit à la chaussée en ce 8 août 2016, abaissée par l'action mécanique.

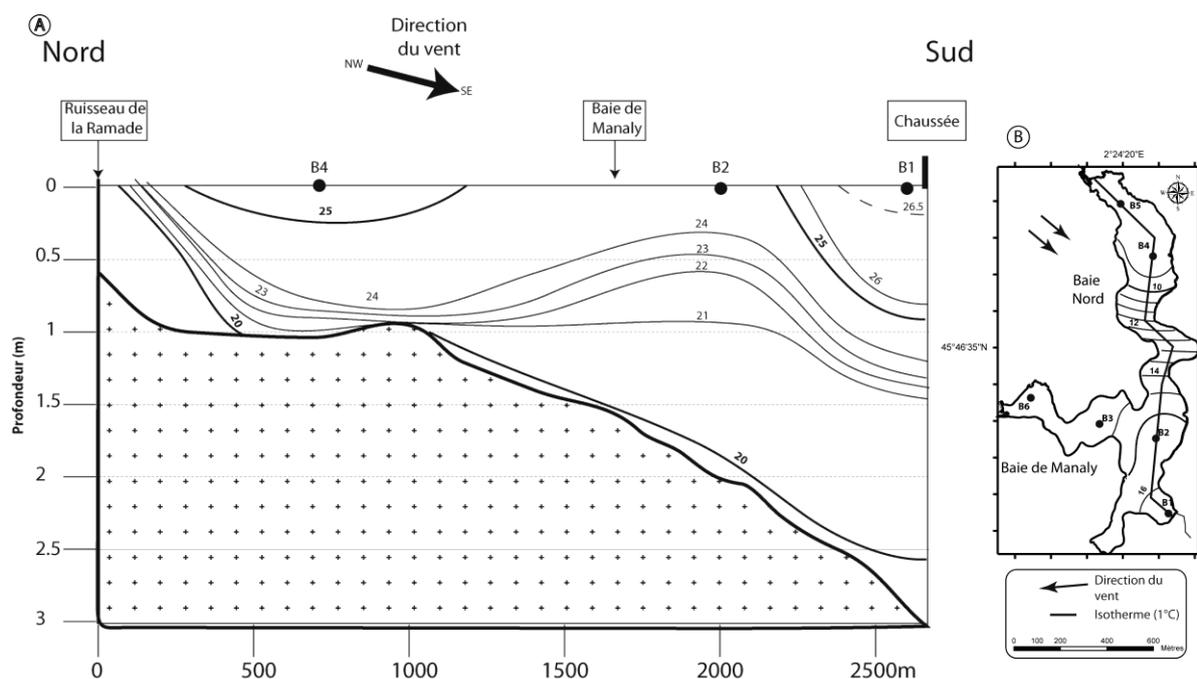


Figure 70: Coupe thermique de l'étang de la Ramade du ruisseau de la Ramade à la chaussée de l'étang, le 8 août 2016 à 18h. Choffel et al., 2018

Le 3 août 2016: effet d'un vent de sud-ouest sur l'étang en période estivale

La journée du 3 août 2016, un vent de sud-ouest vient frapper l'étang de la Ramade. L'action du vent de sud-ouest pousse les eaux chaudes dans sa direction opposée, soit vers le nord-est de l'étang et le secteur peu profond. La chaleur de la partie profonde centrale est dispersée vers le nord peu profond du plan d'eau. Le nord de l'étang est à une température supérieure à 27°C à la surface, tandis qu'elle dépasse difficilement les 25°C à l'ouest et au sud. La puissance du vent déclenche l'enfoncement de la chaleur dans le nord de l'étang, jusqu'à environ 75 cm de profondeur. C'est à 0,5 m de profondeur que les écarts thermiques sont les plus importants, avec un écart type moyen de 1,9°C sur l'ensemble du plan d'eau. La partie nord connaît une homothermie avec des valeurs chaudes sur les premiers 50 cm tandis que le reste de l'étang est à une température d'environ 23°C, soit 4°C inférieur. L'écart

s'affaiblit à 1 m de profondeur, où l'étang est à la même température du nord au sud et de l'est à l'ouest (Figure 71).

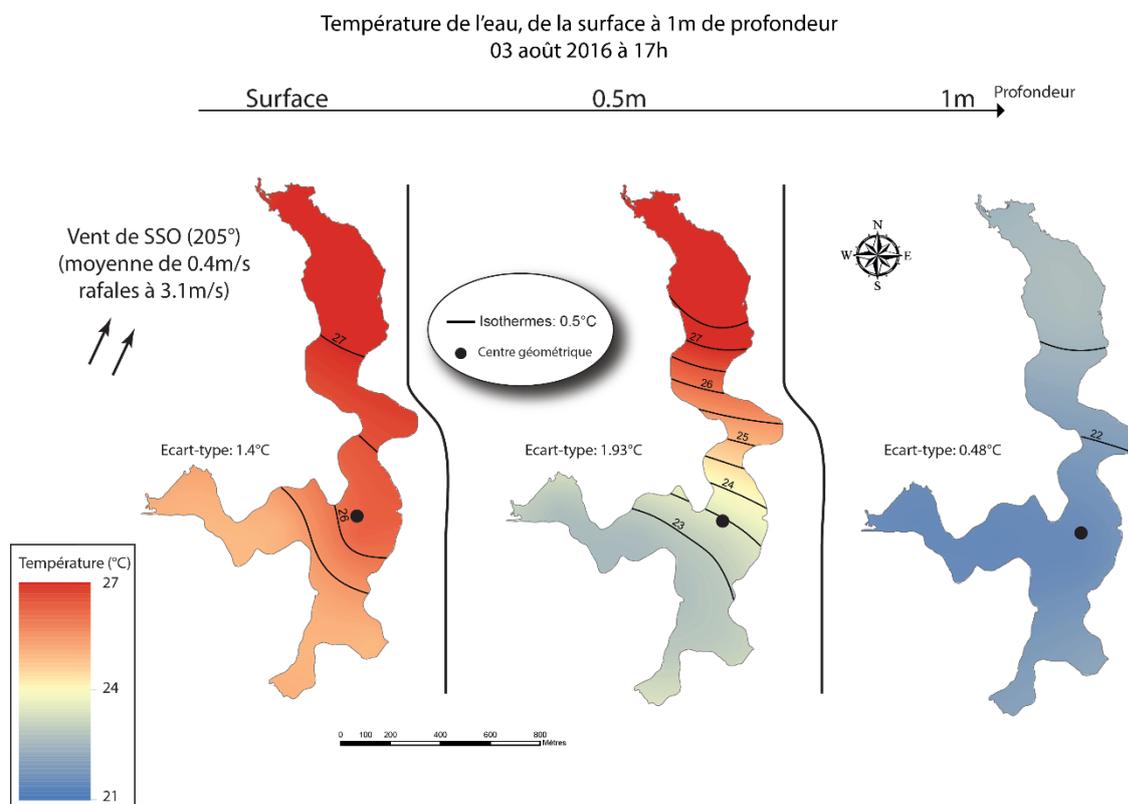


Figure 71: Représentation spatiale de la répartition de chaleur au sein de l'étang de la Ramade de la surface à 1m de profondeur. Le 3 août 2016 à 17h. Choffel et al., 2018

En cette journée du 3 août, les eaux épistagniques sont poussées vers les eaux peu profondes au nord de l'étang. L'abaissement de la thermocline est limité par le fond et la présence d'une faible thermocline aux environs de 0,8m de profondeur. Dans ces zones de faible profondeur, l'amplification de la force du vent peut entraîner un brassage complet de la colonne d'eau, lié à une faible stratification thermique et à la profondeur réduite. A l'inverse, la journée du 8 août 2016 est marquée par une poussée des eaux épistagnique vers les zones des plus grandes profondeurs, par un vent de nord-ouest. Un abaissement plus conséquent de la thermocline, descendant à 1,5 m de profondeur a lieu dans la zone profonde face au vent. L'épaississement de l'épistagnion peut s'épanouir dans la zone au droit de la plus grande profondeur, tandis qu'il est limité par le fond dans la partie nord peu profonde de l'étang lorsque le vent souffle dans cette direction.

6.2.1.2 *L'effet d'un vent intense sur la structure thermique d'un étang*

Analyse journalière exceptionnelle du basculement des isothermes de la composante horizontale à la composante vertical sous l'action du vent

L'action du vent sur une colonne d'eau homogène est particulièrement différente de celle en structure bi ou tri-couches. L'absence de thermocline facilite les échanges entre la surface et le fond. L'action mécanique du vent peut agir sur toute la colonne d'eau, de manière homogène, sans rencontrer de résistance. Le plan d'eau est alors complètement mixé en tous points. Les seules disparités peuvent provenir des effets d'abris par le vent en certains secteurs, liés à la présence d'une végétation haute ou de collines environnantes (Folkard *et al.*, 2010).

La journée du 31 mai 2016 et la nuit du 31 mai au 1^{er} juin ont été marquées par la présence d'un vent fort, d'une moyenne de 2,2 m/s mesuré au bord de l'étang, soufflant du nord-nord-est vers le sud-sud-ouest. Les températures extérieures étaient plus fraîches que celles de l'étang, avec des valeurs comprises entre 8 et 10°C. La baie au nord est exposée aux vents de nord-nord est lié à l'absence de végétation rivulaire sur sa rive est et nord. C'est le seul secteur de l'étang où il y a une absence totale de protection par la végétation rivulaire. En lieu et place des forêt occupant les rives de l'étang, on y trouve des prairies de pâturage sans la présence d'arbres. L'absence d'abris de la baie nord pour des vents de nord et d'est, malgré sa localisation géographique, aura un impact sur l'hydrologie et la température de l'étang. Une cartographie a été réalisée le 1^{er} juin 2016 à 01h00, au maximum d'écart entre les données thermiques continues mesurées. A ce moment de la nuit, l'étang est homogène verticalement en tous points, mais connaît une forte hétérogénéité spatiale horizontale de sa température. L'homogénéité thermique permet une action complète du vent sur l'ensemble de la colonne d'eau. La température du bassin nord chute de 16°C le 31 mai à 01h00 à 10,3 °C le 1^{er} juin à 01h00, avant de remonter légèrement le jour suivant avec 13, 2°C le 2 juin à 01h00. Seul le bassin nord est concerné, la température des autres points mesurés de l'étang ne varie pas et conserve des valeurs entre 16 et 17 °C. Le vent a pour effet de refroidir considérablement la baie nord en agissant sur une structure homotherme. Le bassin sous le vent a une température qui se rapproche de celle de l'air, à 10°C, plus froide que l'ensemble de l'étang et que le cours d'eau entrant, à 12,1 °C. L'effet de refroidissement du vent marqué, entraîne un écart thermique spatial de 5,3°C au maximum, avec un écart

moyen de 4,8°C entre la partie nord et sud de l'étang pendant une période de 21h (Figure 72).

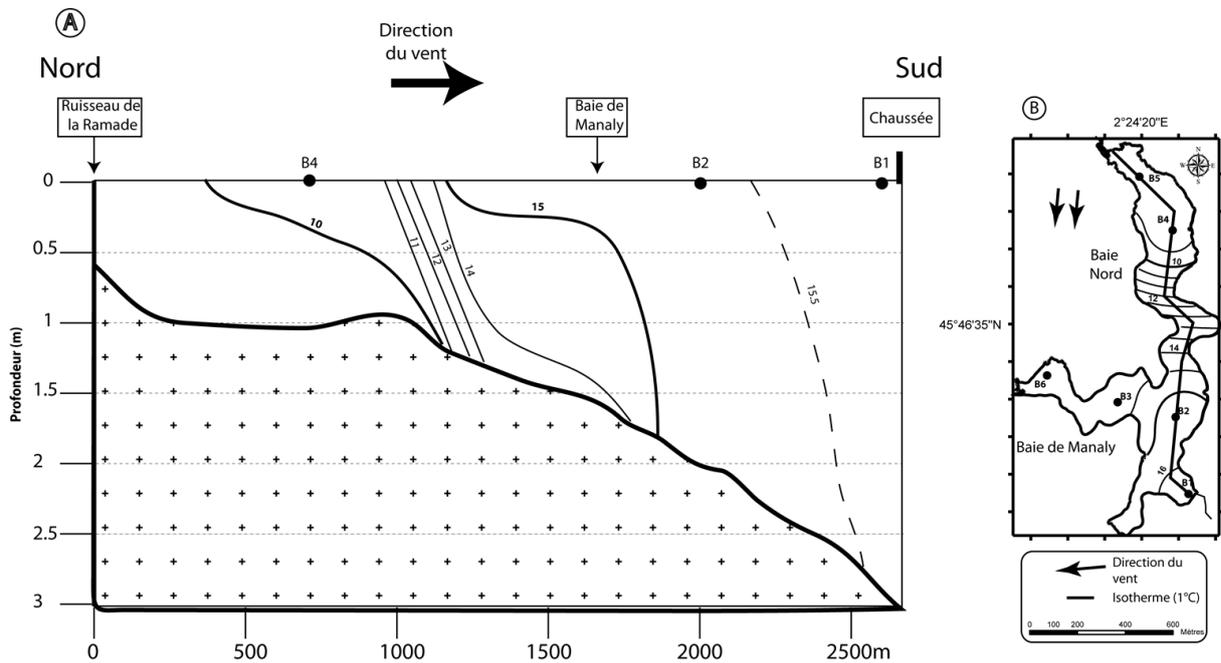


Figure 72: Carte de la variation spatiale de la température de surface (A) de l'étang de la Ramade ainsi qu'une coupe thermique nord-sud (B) le 1er juin à 01h00. Choffel et al., 2018

Le vent fort de nord-nord est transporte les calories vers les secteurs au sud de l'étang, empêchant les calories de former un épistagnion au nord, réduit au seul hypostagnion. Dans le même temps, la partie sud accumule les calories amenées par le vent à tel point que c'est l'épistagnion qui forme l'ensemble de la colonne d'eau, de la surface jusqu'au fond. Par conséquent, les isothermes sont verticales au lieu d'être horizontale. Cette structure des masses d'eau dans l'étang, en déséquilibre, est forcée par le vent, qui donne sa pleine action dans cette direction, car c'est la seule qui, sous le vent, ne soit pas abritée par la végétation.

La direction du vent et sa puissance sont des facteurs déterminants dans l'hétérogénéité spatiale de la température. La force du vent permet, en fonction de sa puissance, d'affecter les couches plus ou moins profondes de l'étang stratifié. Un vent faible peut entraîner des variations spatiales sur les premiers centimètres, n'affectant que la couche superficielle. La direction du vent quant à elle, régit la zonation spatiale de la température. En fonction de l'orientation de l'étang et de la direction du vent, l'hétérogénéité spatiale peut être conséquente. Pour l'étang de la Ramade, allongé dans le sens nord-sud, un vent de nord ou de sud va subir le fetch le plus élevé et donc l'influence la plus forte sur la structure thermique.

6.2.1.3 Etude de l'hétérogénéité thermique du plan d'eau selon la direction des vents

Sur le plan d'eau de la Ramade, les vents dominants sont largement représentés par des orientations sud-ouest et nord-ouest. Très peu de vents d'est ont été mesurés et seulement quelques vents de nord, de sud ou d'ouest. La question principale est, en fonction des vents dominants, quelles représentations spatiales de la température peut-on avoir sur l'étang de la Ramade ?

La carte des données thermiques a été appliquée en fonction des vents à la plus forte occurrence afin de visualiser le comportement thermique spatiale de l'étang. Une cartographie a été réalisé pour des vents de vitesse similaire et de structure thermique la plus proche possible, lors de stratification thermique directe (Figure 73). En fonction de la direction des vents, la température de surface de l'étang se disperse de façon variée. Lors de vents de nord ou de nord-est, dont l'occurrence est proche des 5 % du temps, la partie nord est considérablement refroidie par rapport à la partie sud. La faible protection de la zone au nord du fait de l'absence de forêt riveraine et à un bassin large et peu profond la rend fortement soumise aux vents du nord et nord-est. Celui-ci va pousser les eaux chaudes vers le centre et sud de l'étang et va généralement favoriser une homothermie de la partie nord liée à sa faible profondeur. L'action continue va considérablement refroidir le bassin septentrional.

A l'inverse, lorsque le vent provient du sud-ouest, soit environ 18 % du temps, la zone au nord de l'étang bénéficie des apports d'eau surchauffée de la couche de surface du sud de l'étang. La partie méridionale du plan d'eau est plus fraîche et soumise à un fetch limité. Les vents d'ouest-sud-ouest ont un effet plus important car ils actionnent leur force mécanique sur une course au vent plus conséquente. En revanche, lorsque les vents sont principalement d'ouest, la zone au niveau de la chaussée est abritée et peu concernée par les prélèvements ou apports calorifiques (Figure 73).

Les vents de nord-ouest et ouest-nord-ouest, parmi les plus fréquents, ont une action directe sur la zone au niveau du barrage. Ce secteur sud est celui affecté par la plus longue course au vent. Il bénéficie des apports calorifiques de la couche de surface à l'ouest, réchauffant la partie sud au détriment de celle sous le vent, à l'ouest. Cet apport calorifique se fait ressentir à la surface au niveau de la chaussée, mais aussi en profondeur par l'enfoncement de la strate à la surface surchauffée.

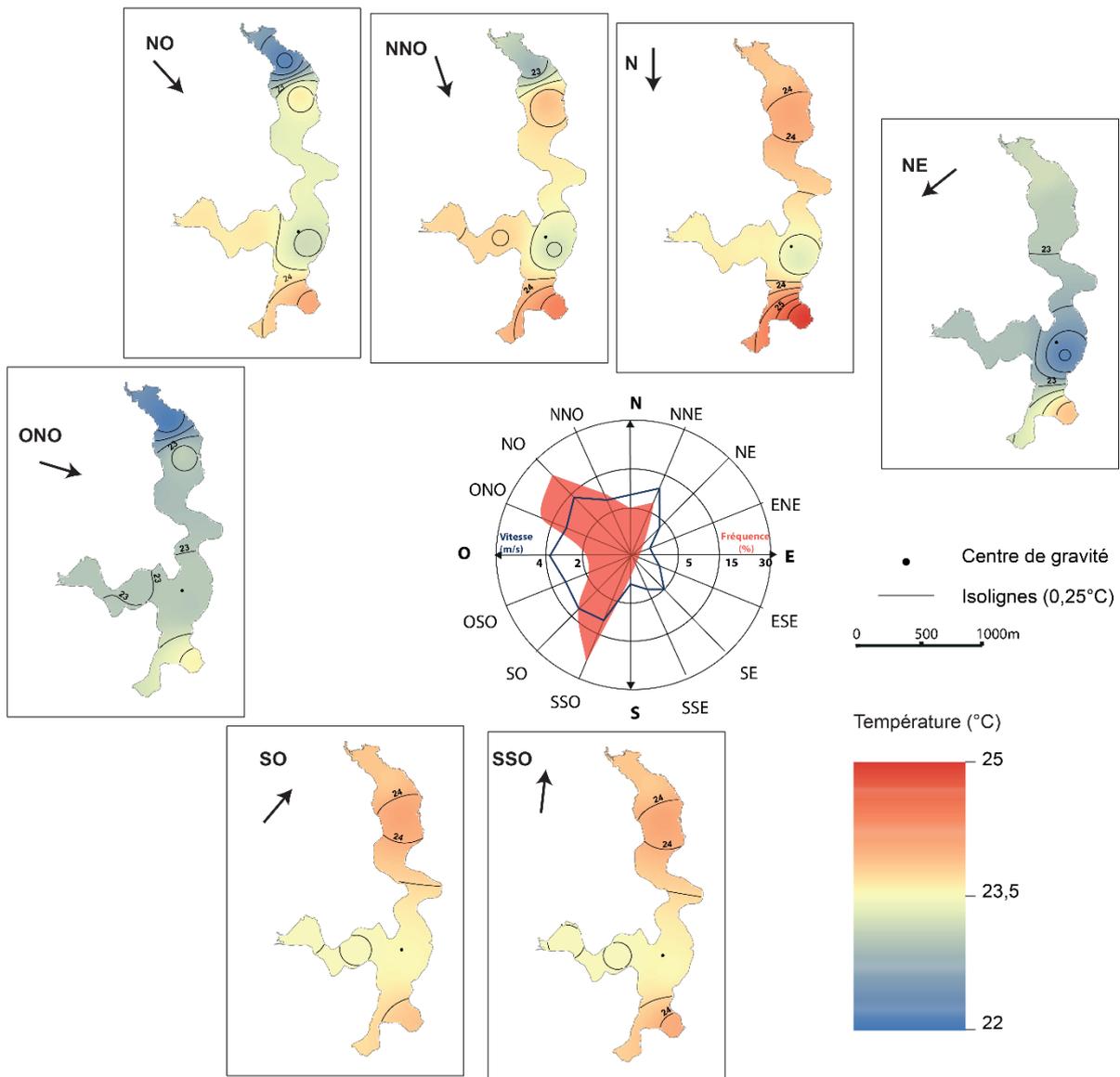


Figure 73: Cartes de température de surface selon la direction des vents, Q. Choffel, 2019

L'effet du vent sur une structure stratifiée est évident dans le cas du grand étang de la Ramade. Sa morphologie complexe et sa forme allongée facilitent l'hétérogénéité spatiale créée par la force motrice du vent. Son action permet la dispersion de chaleur en surface et en profondeur. Les zones affectées dans la composante horizontale dépendent de l'orientation du vent notamment. La morphologie multilobée de l'étang accentue les effets localisés.

La connaissance des vents dominants est essentielle afin d'anticiper des problèmes d'accumulation de chaleur en certains secteurs pouvant impacter la vie aquatique ou le milieu récepteur à l'aval. Pour l'étang de la Ramade, dans les deux orientations éoliennes les

plus fréquentes (sud-ouest et nord-ouest), la seconde à tendance à apporter des calories au niveau de la chaussée durant l'été sur 20 à 30 % du temps. A l'inverse, le vent de sud-ouest éloigne les calories vers le nord environ 15% du temps. Le réchauffement à la surface n'est pas éloigné puisque la faible course au vent ne permet pas de limiter l'apport calorifique. En revanche c'est en profondeur que la chaleur est la plus dispersée vers le nord de l'étang. Pour ce vent, une prise de fond peut paraître judicieuse, alors qu'elle est peu utile pour un vent de nord-ouest.

Ce phénomène peut remettre en question la localisation de la sortie d'eau et ouvrir à une réflexion sur le type de sortie d'eau à préconiser afin de limiter l'impact thermique à l'aval. Dans un cadre plus grand, la localisation des activités de loisir peut également tenir compte de l'orientation des vents dominants. Alors que la mise en place d'une plage de baignade en face des vents dominant peut apporter une eau chaude appréciée des baigneurs, elle peut à l'inverse causer un problème d'érosion demandant un apport permanent de sable (Touchart *et al.*, 2012) avec d'importants coût économiques.

Les grands plans d'eau ont une course du vent forte, facilitant l'action mécanique sur la masse d'eau. Le vent va disperser les calories en certains secteurs de l'étang en surface et en profondeur. Son action diffère en fonction de la structure thermique de l'étang. En structure bi-couche, soit lorsque le plan d'eau est stratifié, son action en profondeur est réduite par la force de la thermocline. Plus le vent est fort, plus il agira en profondeur. Il lui faut une certaine force pour perturber la stratification, pouvant aller jusqu'au brassage complet si la durée et la vitesse du vent est suffisante. Pour les plans d'eau multilobés ou avec des traits de côtes complexe, l'action du vent va engendrer une hétérogénéité spatiale de la température de l'eau, pouvant aller jusqu'à des écarts thermiques conséquents, dépassant les 10°C entre deux secteurs malgré leur proximité géographique, excluant les différences entre le large et le littoral supposées plus grandes.

6.2.2 Peut-il exister des variations spatiales de température au sein de très petits étangs ?

Les grands étangs multilobés sont les premières sources d'hypothèse de variation spatiale de la température. De manière logique, plus un plan d'eau est de superficie importante, plus il est susceptible de créer une hétérogénéité, notamment entre le large et

le littoral, mais aussi entre les différents secteurs du plan d'eau (Danis & Prats, 2018). Les rares études sur la variation spatiale de la température de surface des grands lacs et l'absence d'études sur les étangs laissent penser que ces derniers, par leur petite taille, ne peuvent créer une variation spatiale. Les grands étangs, à l'image de l'étang de la Ramade, de forme complexe, offrent des courses au vent variées, entraînant une répartition de chaleur spatialement inégale. Qu'en est-il des petits étangs ? La superficie des étangs français est d'environ 1 ha en moyenne, soit une très petite taille, alors que l'on se focalise principalement sur les plus grands étangs (Papon, 2007, Carlini, 2006, Brunaud, 2007). Ces petits étangs très nombreux sur le territoire français jouissent-ils d'une parfaite homothermie horizontale ? La très faible course du vent sur les petits étangs laisse penser à une absence d'hétérogénéité possible, mais d'autres facteurs locaux peuvent avoir des effets d'abris ou d'ombrage, dont la conséquence peut être perceptible sur une grande partie de l'étang.

6.2.2.1 Des écarts thermiques conséquents en surface

L'étang de Rilhac-Rancon est représentatif des très petits étangs profonds, présents sur les versants à pente forte. Une butte avec une végétation arbustive haute est présente sur la partie sud-ouest de l'étang, offrant un effet d'ombrage sur une grande partie de l'étang (Figure 67). Notre hypothèse réside sur la capacité de la présence d'une zone ombragée de créer des écarts thermiques malgré la très faible superficie du plan d'eau.

Les trois chaînes de mesures sont distantes de 50 mètres au maximum, entre celle que l'on appellera « ombre » et celle au « soleil ». L'effet de la profondeur sur la structure thermique est une variable qui a été bloquée en plaçant les bouées à 4,02 m pour celle à l'ombre, 4,12 m pour la bouée au soleil et enfin 4,22 m à l'endroit le plus profond de l'étang. Les mesures sur le littoral peuvent amener à des écarts plus conséquents, causés notamment par la faible profondeur d'eau. Cependant nous nous intéressons également au volume, les parties littorales représentant un volume faible comparé à la partie en pleine eau ne seront pas considérées ici. La zone ombragée représente environ le tiers de la superficie de l'étang.

Les températures moyennes annuelles, calculées du 15 septembre 2017 au 15 septembre 2018, sont très proches pour les trois points de mesure, avec un écart inférieur à la marge d'erreur des thermomètres utilisés. A cette échelle il ne semble pas y avoir d'écart thermique réel entre les différents points de la partie centrale de l'étang. Les moyennes

estivales montrent un écart maximum de 0,1 °C de moyenne entre la partie ensoleillée et celle à l'ombre. C'est dans les valeurs maximum que les moyennes montrent la plus grande différence. La bouée à l'ombre est la seule à ne pas dépasser la température de 30 °C à la surface. La zone profonde a dépassé les 30 °C pendant 1h, tandis que cette valeur seuil a été dépassée durant 4h sur l'année 2018 au niveau de la zone est de l'étang, dans sa partie ensoleillée.

L'hypothèse de la variation spatiale de température liée à l'effet d'ombrage entraîne une logique principalement journalière, les écarts se faisant ressentir dans les périodes d'ensoleillement. Sur une journée ensoleillée, l'écart thermique est élevé entre la zone de l'étang au soleil et celle à l'ombre. L'écart moyen de 0,2 °C entre les deux zones sur les 18 442 données horaires de surface, est limité par l'homothermie spatiale nocturne. Une fois que le rayonnement solaire n'atteint plus la surface de la partie est de l'étang, l'écart thermique entre l'ouest et l'est diminue et une homothermie spatiale s'installe durant la période nocturne (Figure 74). C'est à l'échelle de l'après-midi que les écarts sont les plus importants, avec une moyenne de 0,2°C de différence entre la zone à l'ombre et celle au soleil, de septembre 2017 à octobre 2018 sur la période horaire de 12h à 19h. Sur la seule période estivale, allant du 21 juin au 20 septembre, l'écart moyen est deux fois supérieur, atteignant les 0,5 °C.

Les moyennes ne sont pas représentatives de la variation spatiale de la température, car des dynamiques intra-horaires semblent être majoritaires. Un changement d'échelle s'impose afin d'analyser les écarts réels pouvant avoir lieu sur des pas de temps courts (Figure 74). La valeur maximale instantanée d'écart thermique entre les 50m qui séparent les deux chaînes de thermomètre est de +3,3 °C pour la chaîne au soleil et nécessite donc une analyse plus précise.

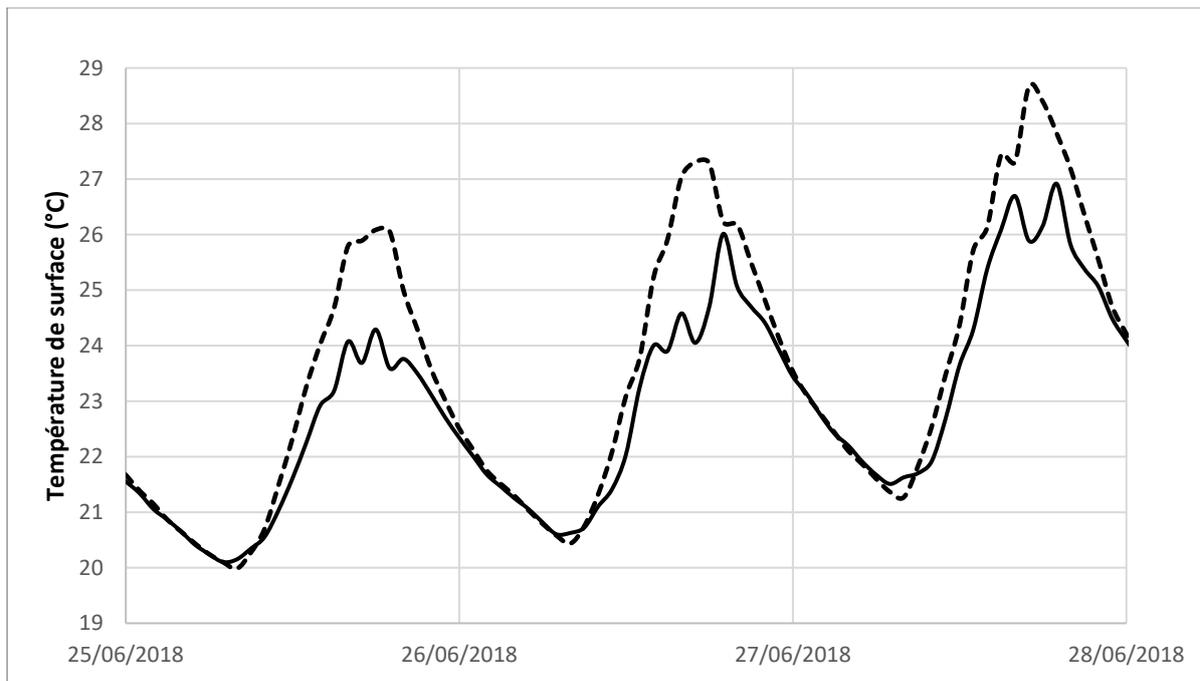


Figure 74: Evolution comparée de la température de surface à la bouée à l'ombre (ligne noire) et celle au soleil (pointillés), du 25 au 27 juin 2018

Sur des journées estivales ensoleillées, les températures sont similaires jusqu'au milieu de la matinée, vers 11h, où un léger écart se creuse lors de la montée de température. Le décalage est dans la vitesse de progression, où la zone ensoleillée a une évolution positive plus rapide que celle à l'ombre. La courbe d'évolution de la température de surface du secteur ensoleillé atteint un pic tandis que la partie ombragée est limitée et reste à une température environ 2°C inférieure, pour les journées du 25 au 27 juin. Ces journées de juin sont un exemple que l'on retrouve à de nombreuses reprises lors de l'analyse des données thermiques de l'étang. Lors de journées ensoleillées, l'écart de 2°C est régulièrement atteint entre les deux secteurs. La partie ensoleillée bénéficie d'un apport calorifique supplémentaire par son exposition au rayonnement direct du soleil.

Les écarts thermiques les plus importants entre les parties ensoleillées et ombragées ont lieu lors de fort rayonnement solaire (Figure 75). Les journées ensoleillées favorisent l'accumulation de chaleur dans la partie exposée, tandis que celle à l'ombre ne bénéficie pas de la même quantité de rayonnement. De fait, c'est lors de ces journées que l'hétérogénéité spatiale de la température est maximale et confirme l'hypothèse d'une influence du rayonnement solaire dominante face aux autres facteurs externes tel que le vent.

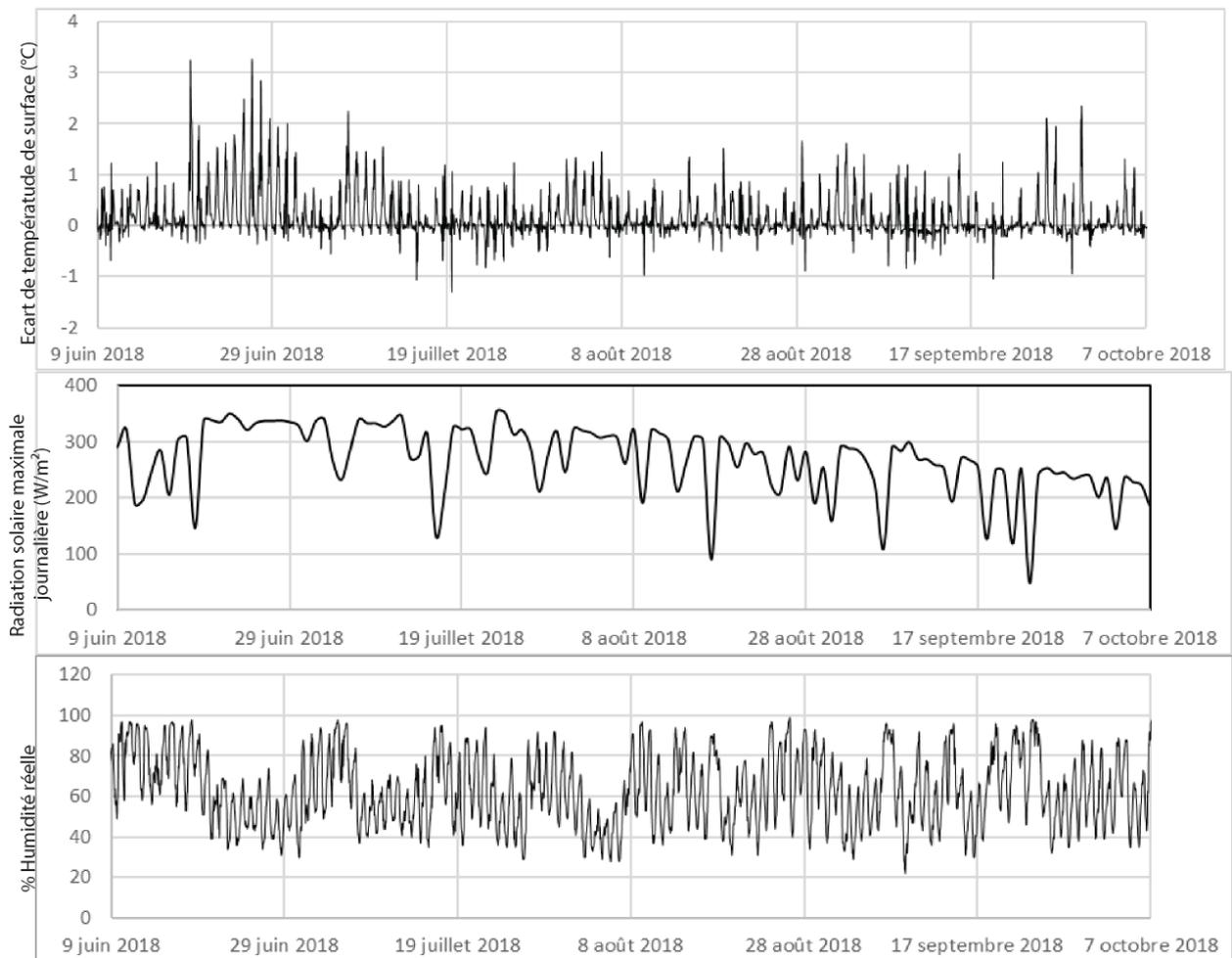


Figure 75: Ecart thermique entre les zones ombragées et au soleil. Variation du rayonnement maximal journalier et du pourcentage d'humidité réelle

Le 11 juillet est caractéristique d'une journée ensoleillée estivale et montre la zonation thermique avec une zone fraîche au sud-ouest de l'étang, au niveau de la butte végétalisée. Le reste de l'étang est légèrement plus chaud (Figure 76). Ces écarts sont minimisés ici par les données ponctuelles prises en fin de matinée tandis que le maximum de zonation spatiale a régulièrement lieu en fin d'après-midi. Le 11 juillet à 17h, l'écart entre les deux secteurs a été mesuré par nos chaînes de thermomètre à 1,6°C pour le maximum.

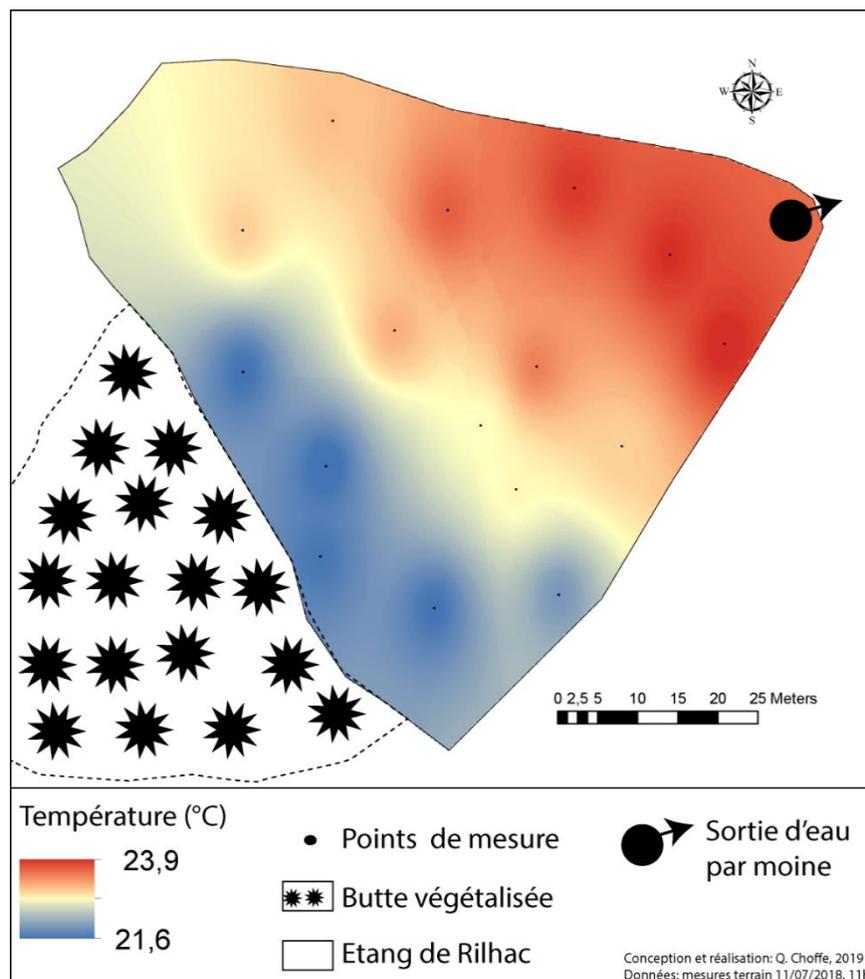


Figure 76: Cartographie de la température de surface de l'étang de Rilhac le 11 juillet 2018 à 11h. Q. Choffe, 2018

6.2.2.2 Une différenciation réduite de la structure thermique de l'étang

L'effet de l'ombrage, à l'inverse de l'action forcée par le vent, ne semble pas affecter les profondeurs et se limite à la couche de surface (Figure 77). Le réchauffement de la couche superficielle pour les zones exposées aux rayonnements solaires maximum entraîne une augmentation de la stabilité de la colonne d'eau. La partie supérieure surchauffée déclenche la formation d'une thermocline temporaire entre la surface et 50 cm de profondeur. La thermocline est plus haute sur la partie ensoleillée au milieu de la journée, à environ 40 cm de profondeur, tandis qu'elle se situe à 60 cm de profondeur pour la zone ombragée. Dans la partie ensoleillée, la thermocline oscille entre des valeurs de 40 cm au plus haut, lorsque l'effet de la radiation est à son maximum journalier, pour ensuite plonger à environ 60 cm de profondeur lorsque la radiation solaire stoppe son effet de réchauffement direct sur l'étang.

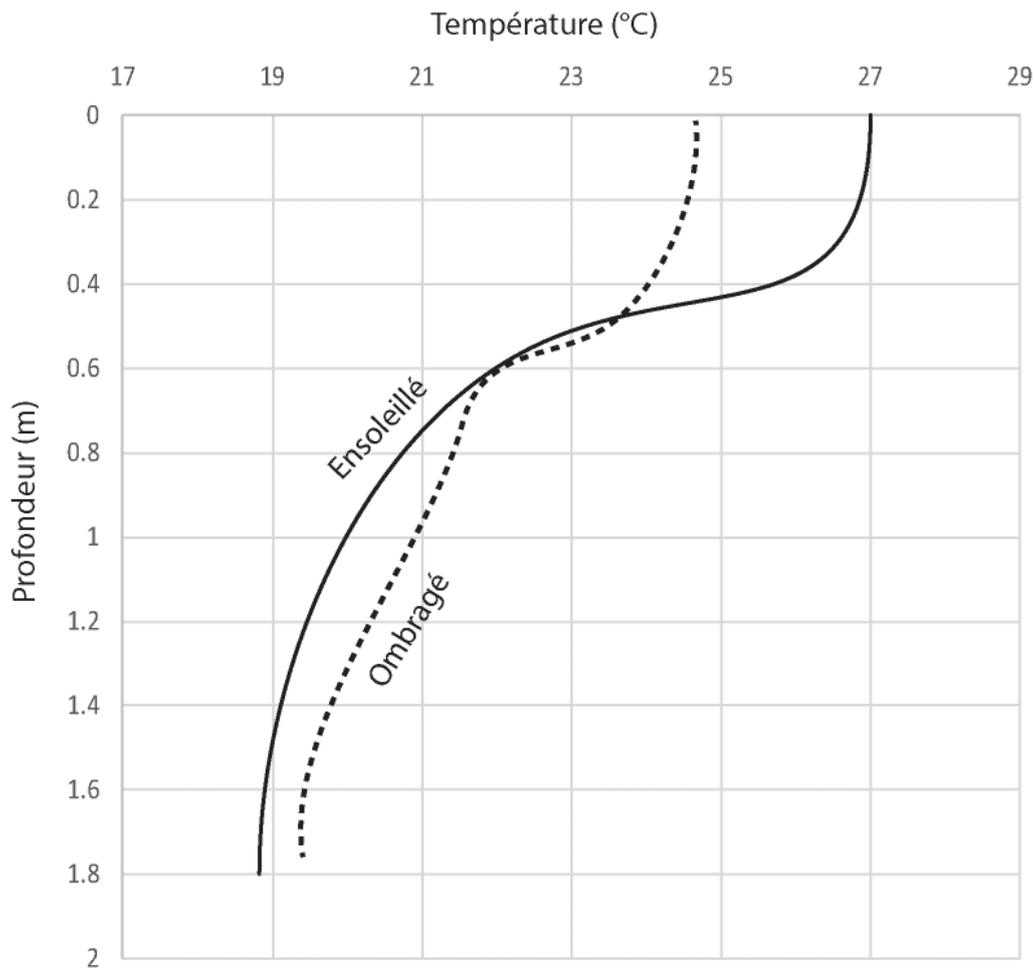


Figure 77: Profil thermique vertical des deux secteurs étudiés de l'étang de Rilhac, à l'ombre et au soleil

La stabilité de la colonne d'eau, mesurée aux trois points de l'étang, diffère peu. Le seul écart perceptible est dans le maximum de la fréquence N^2 , avec une valeur de 79 pour la partie ensoleillée et 74 pour la zone ombragée. Le réchauffement de la partie superficielle, en augmentant l'écart thermique et donc de densité entre la surface et le fond renforce la stabilité de la colonne d'eau. La partie ensoleillée peut développer une stratification thermique plus forte que la zone ombragée, mais les écarts restent peu importants dans les moyennes du fait de l'occurrence du phénomène, observable uniquement lors des journées ensoleillées et entre 11 et 18h environ.

Notons que cette différence, qui fait que la thermocline s'enfonce en direction de la zone ombragée et se relève en direction de la zone ensoleillée, provoque une instabilité de densité. Deux réponses sont possibles pour rétablir l'équilibre : d'une part de petits courants de densité peuvent se produire, qui devraient transférer de l'eau superficielle en direction de la zone ensoleillée et de l'eau profonde en direction de la zone ombragée, d'autre part de petits

flux d'air pourraient faire entrer en résonance le balancement de la thermocline. Des réponses de ce type ont été identifiées par des mesures de température toutes les 10 minutes sur une période de fin août à début septembre, au droit de la zone du point le plus profond (Figure 78). Dans l'après-midi, des oscillations de la température peuvent être mesurées à toutes les profondeurs. Cette variation rapide de température est la plus visible lors des temps ensoleillés et lorsque l'étang est en stratification thermique directe. La température varie alors entre 0,5 et 1,5 °C environ au maximum. La période de ces seiches internes est d'environ 20 à 30 min, avec un maximum mesuré de 1h15 le 29 août.

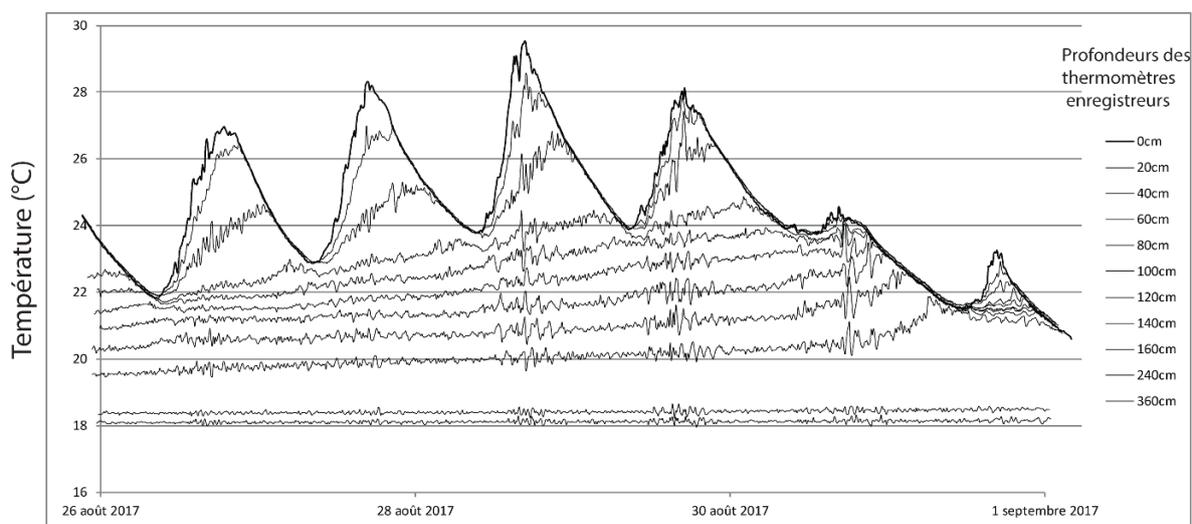


Figure 78: Mesures de températures toutes les 10 minutes dans l'étang de Rilhac, au point le plus profond, du 26 août au 1er septembre 2017. Q. Choffel, 2019

Il est difficile d'aller plus loin dans l'analyse, qui réclamerait un pas de temps plus fin encore que celui de 10 minutes, descendant à la minute ou à la seconde, mais il est manifeste que des phénomènes proches de ceux-ci ont eu lieu dans les derniers jours d'août 2017. Ainsi, même sur l'étang de Rilhac d'une superficie de seulement 0,4 ha, de petits flux de densité ou un mouvement oscillatoire au niveau des couches de discontinuités peuvent s'opérer, à l'image des seiches internes des lacs (Wedderburn, 1910, Mortimer, 1952, Lemmin, 1995) ou d'oscillations analogues détectées dans les plus grands étangs, comme celui de Cieux (Touchart, 2001).

L'hétérogénéité spatiale n'est pas le propre des grands plans d'eau. Les étangs les plus petits peuvent bénéficier de cette hétérogénéité, provoquée par les facteurs environnementaux directs. L'effet de l'ombrage semble un élément majeur dans la température de surface, dépassant les seuls effets entre large et littoral. D'autres facteurs

environnementaux tels que la présence d'un tributaire ou l'influence de l'arrivée d'eau de nappe peuvent probablement avoir un effet d'hétérogénéité de la température de l'eau.

6.3 L'influence des échanges hydrologiques dans la zonation thermique

6.3.1 L'arrivée d'un tributaire peut-elle perturber la structure thermique d'un plan d'eau ?

L'existence d'une chaussée barrant le lit mineur et le lit moyen, permet la création en amont d'un plan d'eau. Ces étangs bénéficient des caractéristiques physico-chimiques du ou des cours d'eau entrants tandis que leur capacité à se stratifier permet la segmentation entre les deux entités lenticques et lotiques (Touchart, 2007). En plan d'eau, les échanges dominent dans leur composante verticale au détriment de l'effet longitudinal en cours d'eau. Pour ces derniers, c'est la pente qui permet un brassage permanent. En étang, le facteur vertical domine (Touchart, 2007, 2010, Folkard *et al.*, 2010) avec pour conséquence la modification des paramètres physico-chimiques, dont notamment la température et l'oxygène. Dans une logique centrée sur l'étang, on peut se demander si une fois l'étang installé, le cours d'eau a encore un rôle perturbateur pour le milieu stagnant, modifiant ses caractéristiques. Ou bien cette influence est-elle inexistante ou réduite à un secteur de l'étang, principalement la zone d'entrée du tributaire ?

La localisation de la partie de l'étang influencée par le tributaire reste difficile à mesurer (Carlini, 2006). Elle varie certainement en fonction du débit du cours d'eau entrant, du volume du plan d'eau ainsi que de la morphologie de ce dernier, soit du temps de séjour. La principale question est de savoir s'il existe une partie de l'étang proche du fonctionnement lotique tandis que le reste de l'étang aurait un fonctionnement lenticque ? Ou bien, dès lors que le cours d'eau pénètre dans l'étang récupère-t-il les caractéristiques de ce dernier ? Nous avons tenté de mesurer, en continu, la température en plusieurs points de l'étang, répartis de l'amont vers l'aval, suivant l'hypothétique cours d'eau original, afin de mesurer l'apport du tributaire dans le milieu lenticque.

6.3.1.1 Etude d'un étang au temps de séjour court

La Zinsel du Nord est un cours d'eau de rang 3 sur l'échelle de Strahler lorsqu'il se jette dans plusieurs étangs, puis dans l'étang communal de Baerenthal. Ses paramètres physico-chimiques ont déjà été influencés par la présence d'étangs en amont, mais la récupération

naturelle du cours d'eau lui permet de garder des caractéristiques lotiques à son arrivée dans l'étang de Baerenthal, situé à 3,5 km en aval du dernier étang. Les étangs sont généralement localisés sur des petits cours d'eau en tête de bassin, avec un débit faible, voire même un écoulement intermittent pour ceux situés sur des rangs 0 de Strahler. L'étang de Baerenthal a la particularité d'être présent sur un cours d'eau important, avec un débit conséquent de 542 l/s en moyenne⁴⁴ sur l'année. Ce qui nous donne un temps de séjour des eaux de l'étang estimé à une moyenne annuelle de 3,2 jours, avec une hypothèse de forte influence du cours d'eau entrant sur le milieu récepteur stagnant.

Suivi thermique en continu de l'étang en plusieurs points

Les moyennes thermiques à l'échelle de la période d'étude, soit du mois d'août 2017 au mois d'octobre 2018 sont de respectivement 14,1°C, 13,9°C et 13,8°C pour les secteurs situés au niveau de la chaussée, du centre et de la queue de l'étang. Il existe un écart moyen, de 0,3°C entre la partie la plus en amont et celle la plus en aval de l'étang. Nous précisons que nous n'avons pas placé de chaîne thermique dans la queue d'étang à proprement parler car elle est située dans une réserve naturelle et son accès est donc restreint. Durant la période hivernale, les écarts thermiques entre les secteurs mesurés de l'étang sont faibles, ne dépassant pas les 0,1°C entre la partie centrale et la chaussée. C'est lors de la période chaude que les écarts sont les plus importants. De mai à octobre 2018, la partie amont de l'étang est d'en moyenne 20,6°C contre 21,2°C au niveau le plus aval, soit à la chaussée. Cet écart de 0,6°C de moyenne sur 6 mois est conséquent et laisse présager des écarts thermiques ponctuels importants lors de certaines périodes, ou à certains moments de la journée. Cependant, il ne permet pas d'identifier la source directe de cette hétérogénéité, qui peut être l'arrivée du cours d'eau ou l'action mécanique du vent.

L'analyse à l'échelle hebdomadaire montre une tendance à de plus faibles températures plus l'on se rapproche de la queue de l'étang, suivant un gradient positif amont-aval. La partie amont est régulièrement inférieure à celle de la chaussée. La partie amont est d'environ 2°C inférieure à la partie aval du plan d'eau sur plusieurs jours, comme les 17, 18 et 19 août 2018 (Figure 79). Sur certaines journées, elle se rapproche de celle à la chaussée, bien qu'elle ne la dépassant que très rarement. Les conditions météorologiques telles que la

⁴⁴Mesure de débits dans le cadre d'un suivi permanent du PNR Vosges du Nord, mesures réalisées par Alban Cairault sur les années 2017 et 2018.

force et la direction du vent ont un impact également sur la répartition de chaleur sur le plan d'eau, qu'il reste difficile d'isoler. Lors de journées très chaudes et peu ventées, comme la journée du 16 août 2018, l'étang a une température quasi similaire sur l'ensemble de la surface en eau. Les jours suivants, la zone au niveau de la chaussée est généralement la plus chaude, dans les maxima et minima des températures de surface. Les vents dominants d'ouest-sud-ouest durant l'été vont dans le sens d'un réchauffement des eaux vers la chaussée et compliquent l'analyse thermique.

Il persiste un écart de 0,6°C sur les maxima, tandis qu'il est de 0,8 °C pour les minima. Sur la semaine étudiée plus en détail, l'écart entre les trois parties de l'étang concerne également les minima. La partie centrale et la chaussée semblent retrouver une homothermie spatiale de la température de surface, tandis que la partie amont reste plus froide en surface.

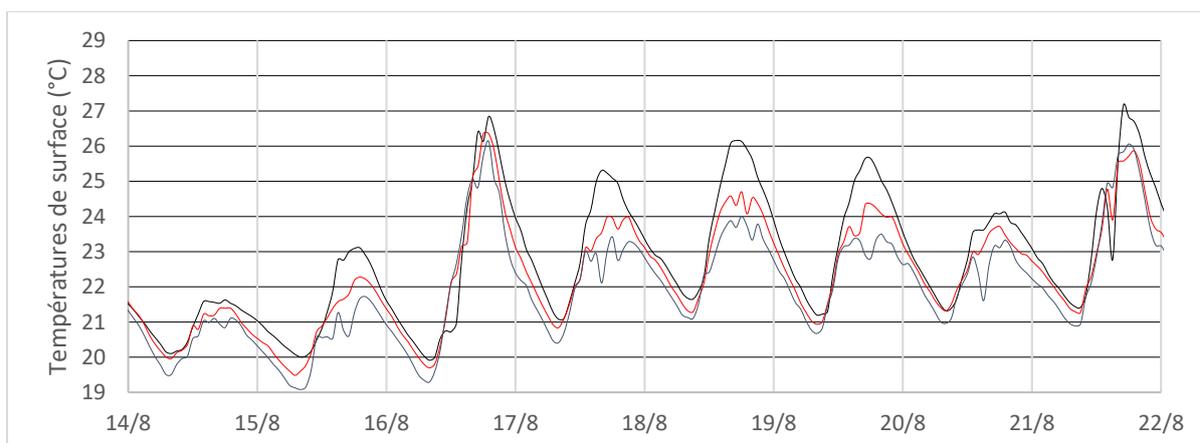


Figure 79: Courbes de température de surface des secteurs à la chaussée (noir), au centre (rouge) et à l'amont (bleu) de l'étang de Baerenthal en 2018

Les écarts thermiques de température de surface sont liés également à l'action du vent sur le plan d'eau, comme pour tout plan d'eau dont la course du vent est suffisante. Les vents dominants d'ouest entraînent les eaux chaudes vers la chaussée, l'étang étant orienté dans le sens ouest-est. Les quelques moments affectés par le vent d'est et nord-est déclenchent une inversion du phénomène. Le dispositif mis en place laisse penser à une domination des facteurs externes atmosphériques dans la variation spatiale de la température de l'étang de Baerenthal.

Cependant, il reste possible d'approfondir l'hypothèse d'une possible influence d'un tributaire dans l'étang. Cette influence peut être localisée en certains points et demande un changement d'échelle en analysant également les températures de l'ensemble de la colonne d'eau, notamment par la plongée du tributaire, plus dense, dans les couches de densité proches. Les effets peuvent être mesurés instantanément, à l'image de la coupe amont-aval (Figure 80). Cependant, le vent, bien que faible et de direction sud-nord, et donc de fetch réduit et ne perturbant ni la chaussée, ni la queue de l'étang, peut avoir une influence sur le résultat obtenu.

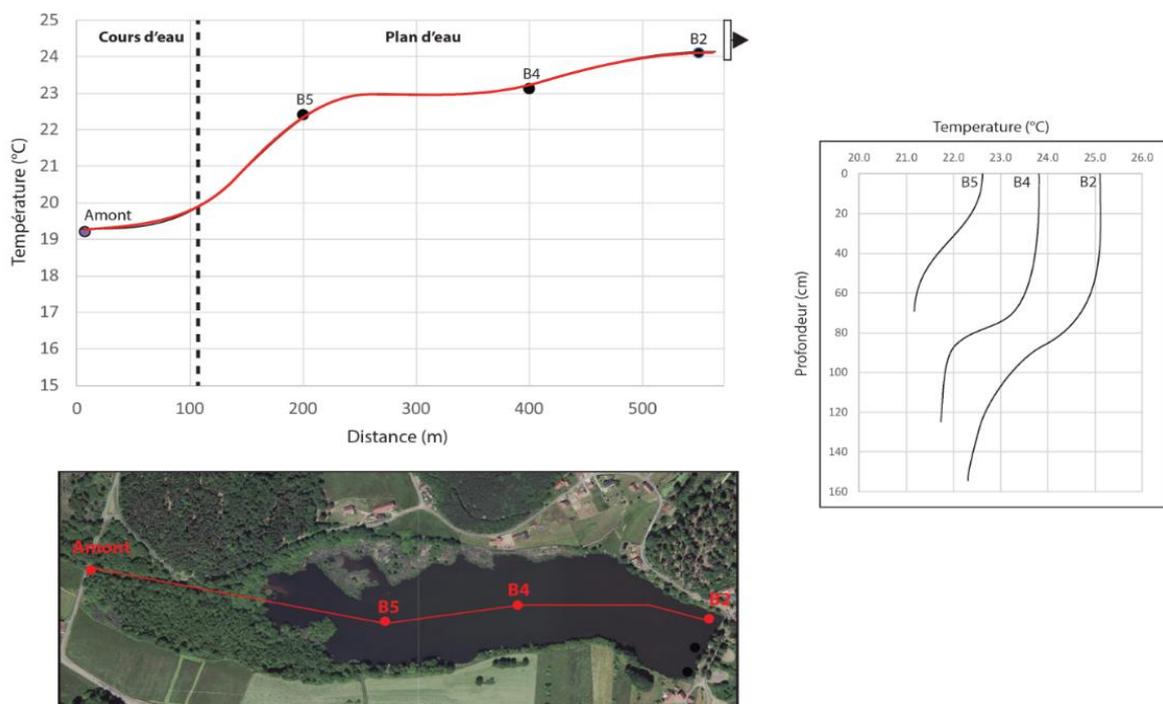


Figure 80: Coupe thermique dans l'étang de Baerenthal de l'amont vers l'aval. Le 10 août 2018 à 16h. Q. Choffel, 2018

La structure thermique de la bouée la plus en amont (B5) est plus faiblement stratifiée, avec des températures de surface et de fond plus fraîches. La stratification y est faible et localisée proche de la surface, tandis qu'elle est profonde en ce 10 août 2018 sur les deux autres secteurs de l'étang. En B4 (Centre) et B2 (Chaussée), la température varie peu sur les 60 premiers centimètres avant de chuter dans les strates profondes.

L'étude thermique sur le long terme ne permet pas de manière très efficace de déterminer si l'on a un effet cours d'eau dans l'étang. Celui-ci semble ponctuel ou, du moins, l'espacement entre l'entrée du cours d'eau et la chaîne de mesure la plus en amont semble être suffisant pour que cet effet ne soit pas toujours mesurable. Une tendance semble montrer une légère différence de température entre la partie la plus proche de la queue et celle à la chaussée, en faveur de cette dernière. Les profils thermiques sont assez proches indépendamment des variations de bathymétrie. Il est possible d'émettre l'hypothèse que, soit le cours d'eau affecte l'ensemble de l'étang en modifiant la structure thermique de l'ensemble du plan d'eau, soit ces influences sont très localisées en certains secteurs. Dans la seconde possibilité, des mesures ponctuelles plus précises peuvent parvenir à mesurer l'influence ou non d'un tributaire dans un étang semblable à celui étudié.

L'apport des mesures ponctuelles dans l'étude de l'influence d'un tributaire

Des sondages avec la sonde CastAway permettent de réaliser des cartes de température et conductivité à une résolution plus grande, à la fois dans les mesures et dans leur dispersion. Une campagne de mesure a été effectuée le 19 juin 2018, par temps calme et ensoleillé, avec un vent très léger de sud, de 4 à 6 km/h en moyenne. L'étang a été sondé en 25 points de mesure, entre 14h et 14h50, soit environ 2 points à l'hectare, incluant la zone de la queue de l'étang.

La partie ouest de l'étang, dans sa zone amont, est la plus froide en cette journée du 19 juin 2018. Dans la queue de l'étang, après son passage dans l'aulnaie marécageuse, la température de l'eau est inférieure à 19 °C sur l'ensemble des 80 cm de la colonne d'eau quasi homotherme. Le cours d'eau de la Zinsel se jette dans l'étang à une température de 17,1 °C. Dans l'étang, plus à l'aval, la température gagne rapidement 2°C après avoir quitté la queue d'étang. Quelques mètres après l'élargissement du plan d'eau, à l'emplacement de la bouée 5, la température de l'eau est comprise entre 20,5 °C et 21 °C. Une légère stratification thermique a débuté, avec des écarts d'environ 2°C entre la surface et le fond. Sur toute la partie centrale de l'étang, comprise entre 1 et 1,5 m de profondeur, la température de surface est comprise entre 21 et 22°C, avec une couche de fond à 19°C environ. A la chaussée, la température dépasse légèrement les 22°C, tandis qu'à 2,5 m de profondeur, la température est toujours d'environ 19°C (Figure 81). D'après la coupe thermique d'ouest en est, passant proche de la zone sud de l'étang, là où la bathymétrie laisse penser au passage du chenal

historique, le cours d'eau semble modifier la température de fond sur la moitié de l'étang. L'eau de fond est plus froide que la partie est de l'étang, à l'exception de la chaussée. Pour cette dernière, l'influence de la profondeur peut jouer sur le gradient thermique. Sur la partie centrale de l'étang, là où la bathymétrie reste inchangée, un gradient thermique négatif d'ouest en est visible.

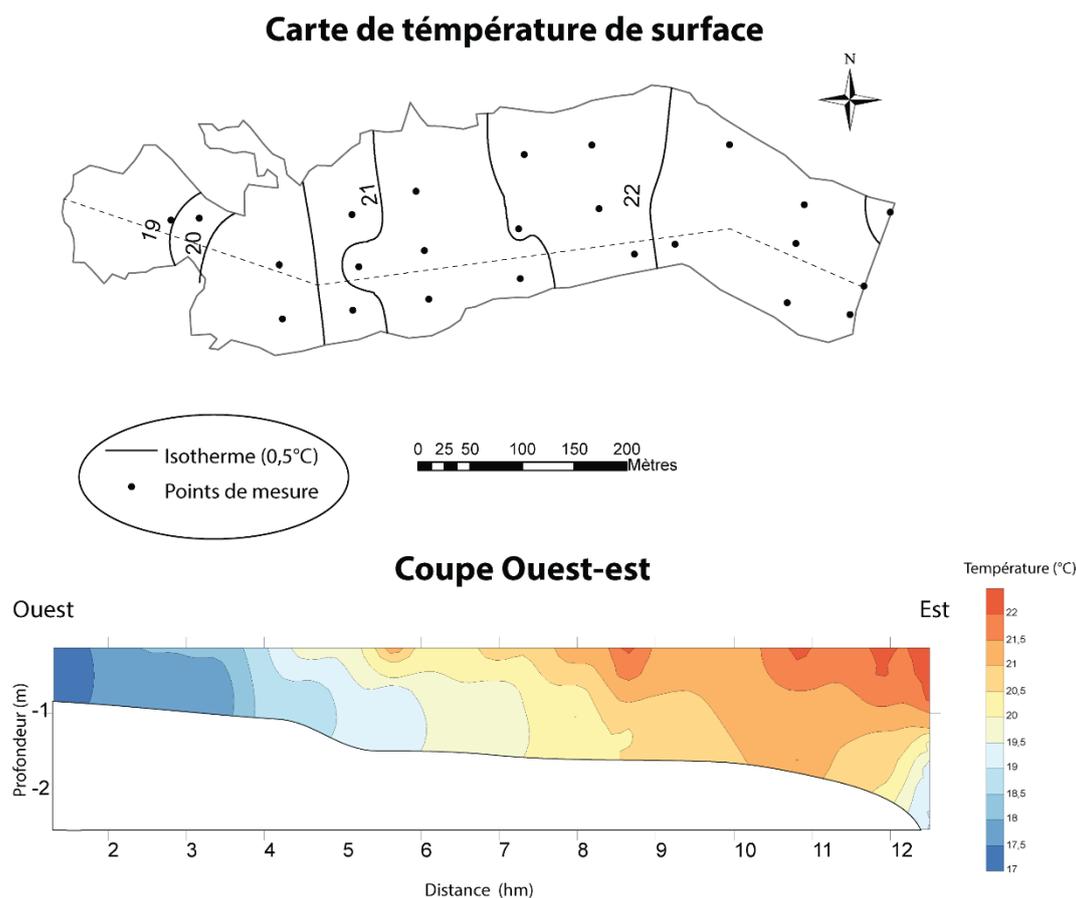
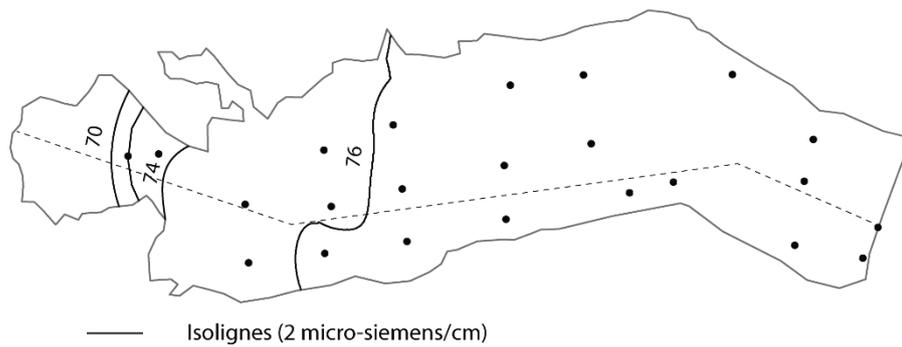


Figure 81: Carte de température de surface (A) et coupe thermique (B) sur l'étang de Baerenthal -19 juin 2018. Q. Choffel, 2018

Etude complémentaire de la conductivité

La conductivité spécifique de l'eau suit la même tendance que la température. La valeur à l'amont est de $66\mu\text{s}/\text{cm}$, contre une moyenne de $71\mu\text{s}/\text{cm}$ dans l'étang. La queue de l'étang est proche des valeurs du cours d'eau amont. Dès que l'étang s'élargit, les valeurs sont rapidement supérieures à $75\mu\text{s}/\text{cm}$ (Figure 82). D'après le suivi de la conductivité, seule la partie amont de l'étang est réellement affectée par l'arrivée d'un tributaire. La queue de l'étang connaît des valeurs élevées tandis que le reste de l'étang a une conductivité inférieure. Cependant, les faibles écarts de conductivité ne permettent pas une analyse plus approfondie.

Carte de la conductivité spécifiques de surface



Coupe ouest-est

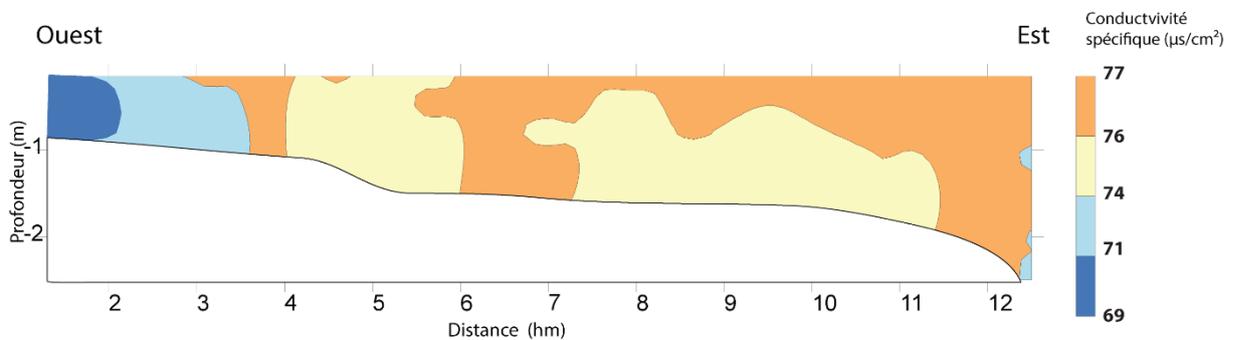


Figure 82: Carte de conductivité spécifique de surface (A) et coupe ouest-est (B) de l'étang de Baerenthal - 19 juin 2018. Q. Choffel, 2018

L'étude à partir de mesures ponctuelles sur l'étang de Baerenthal renforce l'analyse des données thermiques continues. Le cours d'eau semble avoir un impact hydrologique sur l'étang dans la partie la plus en amont, confirmé par les mesures de conductivité exposant l'arrivée d'une eau différente de celle de l'étang. Seule la queue de l'étang, caractérisée par un petit bassin situé entre la zone humide deltaïque et le rétrécissement des berges de l'étang à l'est, est influencée par le tributaire de manière conséquente et durable. Dans ce bassin, malgré la profondeur maximale atteignant 1 m au maximum, les stratifications thermiques y sont rares, jamais mesurées par nos soins lors des 4 campagnes ponctuelles.

A une plus petite échelle, et dès lors que l'on retrouve un élargissement de la masse d'eau, les caractéristiques limniques sont dominantes par rapport à celles lotiques. Les faibles profondeurs de la partie ouest du bassin, dépassant rarement les 1,2 m sont peu stratifiées et le cours d'eau semble plonger au fond de l'étang, dans les couches de densité qui lui sont proches. La faible température, et donc la plus forte densité du cours d'eau, l'entraîne directement vers le fond de l'étang. La thermocline de l'étang est faible et ne permet pas de

mesurer de manière très efficace l'entrée du tributaire. L'arrivée d'un affluent modifie localement la force de la stratification de la colonne d'eau stagnante, que ce soit en queue d'étang ou dans la partie centrale par la plongée des eaux dans le fond de l'étang.

L'arrivée d'un tributaire semble affecter majoritairement la queue de l'étang et assez peu le fonctionnement thermique globale de l'étang. Les mesures en continu, aux quatre points de l'étang de l'amont vers l'aval, montrent une légère différence entre la partie amont, plus fraîche et celle aval, légèrement réchauffée et dont la stratification est plus forte. Les mesures ponctuelles montrent une influence limitée mais affectant notamment le fond de l'étang pendant la période estivale, laissant penser à une influence potentiellement forte lors d'autres périodes, notamment au printemps et en hiver. Une légère perturbation du cours d'eau semble prendre place, mais elle se limite principalement aux premiers mètres, le cours d'eau prenant rapidement des caractéristiques à dominante lenticule dès l'élargissement de la superficie en eau et le ralentissement de la vitesse du courant amenant à une domination des échanges verticaux. Cependant, des étangs avec des affluents plus importants ou des temps de séjour plus courts peuvent théoriquement être plus largement affectés par ces apports hydrologiques.

6.3.1.2 Analyse complémentaire sur un petit lac estonien

Une analyse similaire a été réalisée dans un lac estonien dont le fonctionnement a été modifié depuis la mise en place d'un chenal créant ainsi deux tributaires et un émissaire artificiel au plan d'eau (Punning *et al.*, 1997). Ce lac issu de la dernière déglaciation, est, à l'origine, dépourvu de connexion avec des cours d'eau et était alimenté par la nappe souterraine, comme le sont encore une majorité des lacs de la région de Kurtna (Vainu & Terasmaa, 2016). A l'inverse des étangs français construits par le barrage du cours d'eau, ici c'est le cours d'eau qui vient utiliser les capacités d'autoépuration du lac en créant un chenal traversant le lac. Les eaux du chenal entrant au sud du lac sont issues des eaux usées des mines d'extraction de tourbe et de sable situées à proximité. La conductivité des eaux du chenal sont très élevées comparées à celles des masses d'eau lacustres indépendantes. Ces fortes valeurs sont liées principalement à une concentration élevée en sulfates (SO_4^{2-}) (Marzecová *et al.*, 2011).

Les écarts importants entre les conductivités élevées du chenal artificiel et celles plus faibles du lac et des autres éléments hydrologiques non affectés par ces eaux usées

permettent d'effectuer un traçage de l'eau des tributaires se jetant dans le lac, sans l'utilisation d'outils additionnels. Le temps de rétention moyen du lac est de 13 jours, calculé sur la base de données de débits sur l'année 2017 et 2018⁴⁵ et du volume du lac, soit 4 fois supérieur à celui de l'étang de Baerenthal.

Le lac a été analysé les 8 juin et 11 juillet 2017, en effectuant respectivement 47 et 74 points sur les deux dates. Sur les deux campagnes d'études de fortes similarités ont été mesurées, confirmées par les mesures supplémentaires les 13 et 14 juin 2018⁴⁶. La conductivité spécifique maximale est l'indicateur majeur utilisé ici afin de déterminer la spatialisation de l'effet d'entrée du cours d'eau dans le lac, par son écart important entre celle du cours d'eau et celle du lac.

Analyse de la conductivité du lac Nomme

La partie sud-ouest du lac, au niveau du tributaire, concentre les plus fortes valeurs de conductivité spécifique. Ces valeurs sont localisées au centre, les littoraux bénéficient de plus faibles valeurs, principalement sur les bords nord du plan d'eau comprises entre 881 et 900 $\mu\text{s}/\text{cm}$, tandis qu'elles dépassent les 950 $\mu\text{s}/\text{cm}$ dans la partie centrale du lac. Pour les maximales, les valeurs diminuent dès lors que l'on s'éloigne du tributaire, tout en restant supérieures aux valeurs littorales (Figure 83, B). On constate une diminution brutale de la conductivité spécifique dans le dernier quart aval du lac, à proximité de l'émissaire. Le mélange semble donc avoir lieu à proximité de l'entrée d'eau d'un autre tributaire. L'hypothèse du mélange lié à l'arrivée du second tributaire est la plus probable, bien que l'effet naturel d'épuration de l'eau du lac puisse jouer un rôle également.

Lorsque l'on effectue une coupe longitudinale du lac, suivant le tracé potentiel du cours d'eau, on peut observer les échanges au sein de la masse d'eau en trois dimensions. Le cours d'eau entrant, à environ 16°C, et avec un débit d'environ 145 l/s, plonge dans un lac stratifié et va donc s'insérer dans la couche correspondant à sa densité. Le cours d'eau entre dans le lac et glisse à une profondeur d'environ 1,5 à 2m, correspondant à une température de 16°C (Figure 83, A et C). Sur l'analyse thermique, le cours d'eau a un effet réduit à ce

⁴⁵Les données sont issues d'un projet de recherche de l'université de Tallinn, données récoltées par Koit O., Vainu M. et Terasmaa J.

⁴⁶Les données sur l'année 2018 ont été effectuées lors du travail de terrain des étudiants de licence de l'université de Tallinn. Les données collectées permettent un aperçu pour confirmer les tendances mesurées en 2017 mais ne jouissent pas d'une répartition spatiale suffisante pour effectuer des interpolations cohérentes.

moment car il s'insère dans le lac sans perturber la stratification thermique. La conductivité spécifique élevée du cours d'eau permet de mieux analyser ces échanges, où son influence est mesurée jusqu'à une distance de 400m, soit les trois quarts du lac. Des langues de forte conductivité se déplacent au centre du lac vers l'aval, affectant la tranche d'eau de 1 à 3 m de profondeur. Une deuxième langue est visible plus en profondeur, liée probablement à l'entrée du tributaire à une température plus basse, autour des 14°C (Figure 83, D). Cette seconde langue est probablement due à une arrivée du tributaire antérieure à celle mesurée au moment de la campagne de terrain.

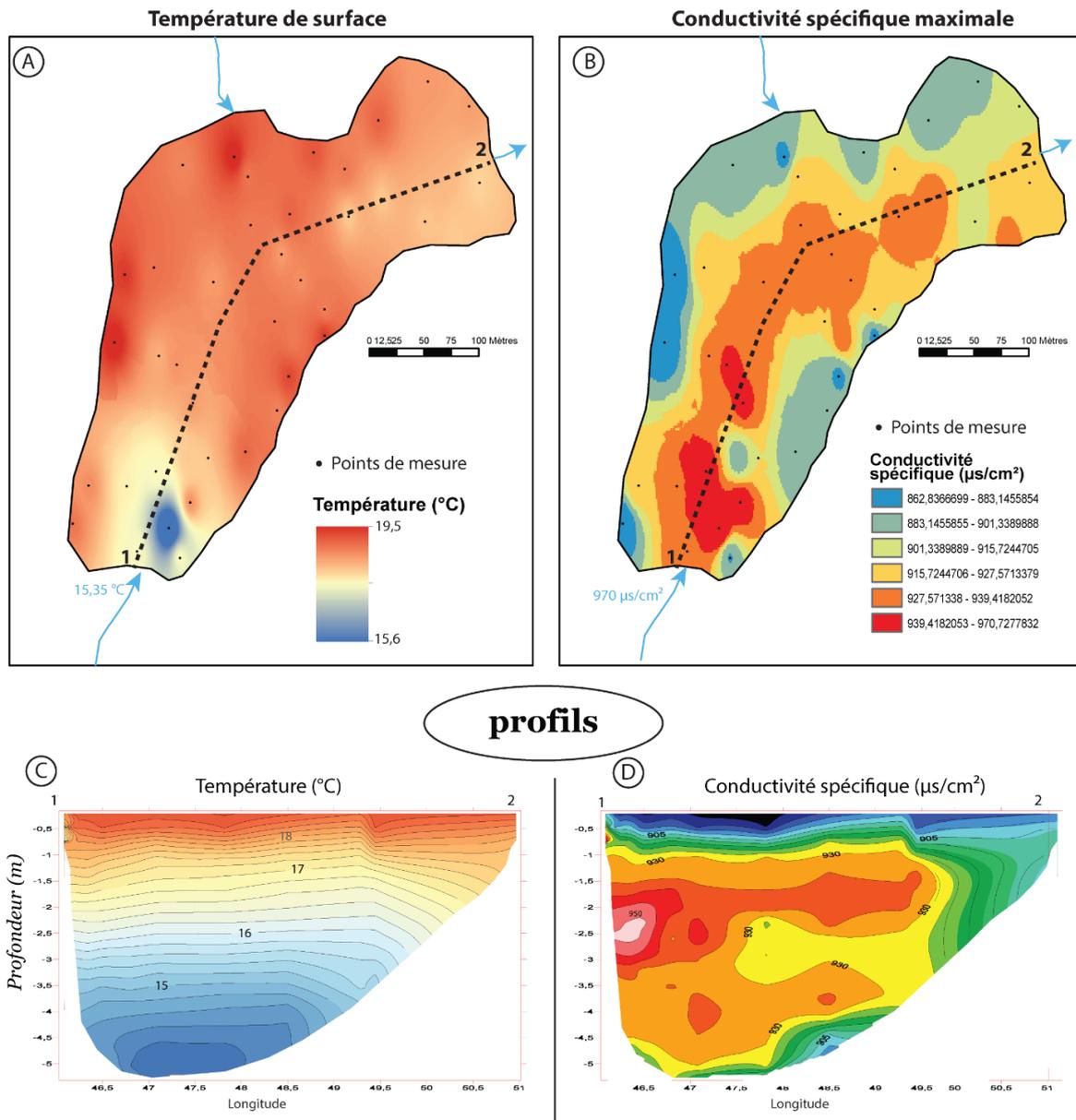


Figure 83: Carte de la température de surface (A), carte de la conductivité spécifique maximale (B), coupe thermique (C) et coupe de conductivité spécifique (D) du lac Nömm.

Les écarts entre les caractéristiques physico-chimiques du tributaire principal différent suffisamment pour être perceptibles au sein du lac Nömm. Pour la température, le tributaire n'a que peu d'influence sur la répartition spatiale de la température au sein du lac, si ce n'est dans la partie deltaïque. Le cours d'eau s'insère dans le lac en fonction de sa température, en ne modifiant que très légèrement la structure thermique lacustre d'un point de vue spatial.

A une plus petite échelle, le cours d'eau a un effet sur la stratification thermique du lac. Les lacs de la région connaissent une stratification thermique forte, à l'image des lacs de

Martiska et Kuradijarv, dont les profondeurs maximales sont proches de celles de Nõmme. Dans ce dernier, malgré ses 5,5 m de profondeur maximale, la stratification thermique est faible (Figure 84). La couche de fond du lac atteint des températures élevées, diminuant le gradient thermique entre la surface et le fond du lac. A cette échelle, le cours d'eau affecte la structure thermique du lac, bien que le fetch plus important du lac Nõmme puisse également produire cet effet.

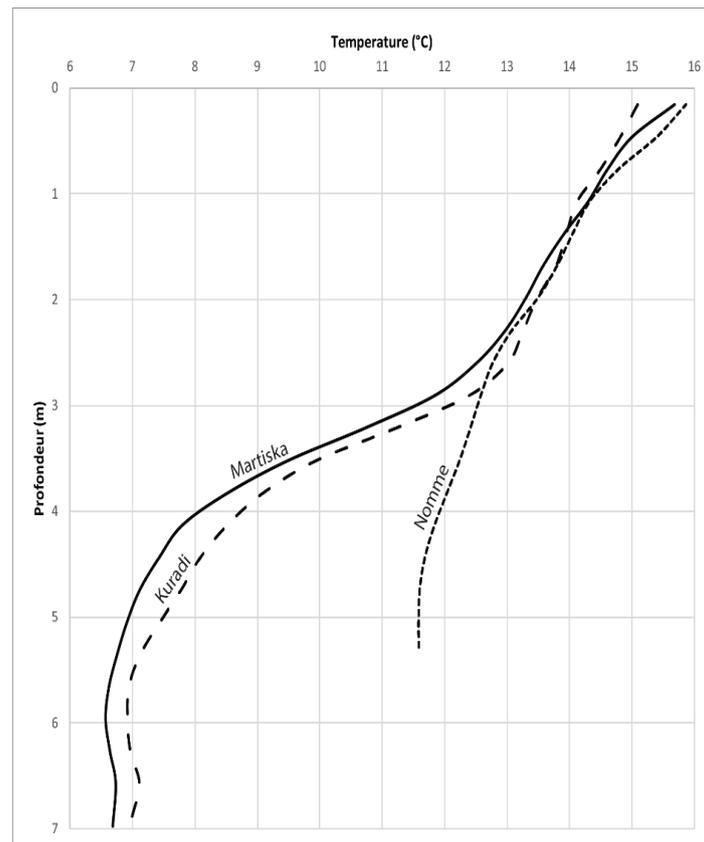


Figure 84: Evolution de la température en fonction de la profondeur des 3 lacs étudiés de la réserve de Kurtna, Estonie. 6-7 juin 2017

Le cours d'eau entrant dans le plan d'eau prend rapidement les caractéristiques de ce dernier. Le plan d'eau n'est affecté thermiquement par le tributaire que dans sa partie amont, se limitant à quelques mètres. En revanche, son action peut modifier la structure thermique du plan d'eau dans son ensemble, notamment pour les couches de fond. C'est surtout le cas pour les lacs où la température de fond est généralement faible, se rapprochant de la température de densité maximale de l'eau douce. Pour ces lacs, l'arrivée d'un cours d'eau peut réchauffer les eaux de fond et donc modifier le fonctionnement thermique de la masse d'eau lacustre. En revanche, pour les étangs, ce phénomène est moins perceptible car les alternances de brassage et de stratification augmentent la température de la couche de fond.

Par son action localisée en amont, l'arrivée d'un tributaire influence la variation spatiale de la température au sein d'un plan d'eau. Cette variation est supposée d'autant plus forte que le temps de séjour des eaux du plan d'eau est faible, induisant le fait que le volume de celui-ci est plus fortement soumis à l'arrivée d'eau d'un tributaire. Dans la structure globale du plan d'eau, il est encore difficile de mesurer l'influence du cours d'eau. Par sa plongée des eaux de fond, il est possible que le cours d'eau modifie la structure thermique de la colonne d'eau en fonction de la température d'entrée et du temps de rétention, élément déterminant dans l'analyse thermique des échanges cours d'eau plan d'eau.

6.3.2 Influence thermique des échanges entre le plan d'eau et la nappe souterraine

Tandis que l'analyse spatiale des échanges thermiques entre les eaux souterraines et les cours d'eau a fait l'objet d'études (Burkholder *et al.*, 2008, Wawrzyniak *et al.*, 2016, 2017), notamment pour déceler des refuges thermiques en période estivale (Ebersole *et al.*, 2001, Dugdale *et al.*, 2013, 2015), elle reste rare en pour les écosystèmes lenticques, la majorité des études se focalisant sur les échanges avec l'atmosphère. Or, les arrivées phréatiques ne peuvent être détectées correctement si l'on utilise uniquement des températures de surface (Wawrzyniak, 2012) ou si l'on se restreint à des mesures en un seul point du lac.

Les échanges entre la nappe et le plan d'eau sont volontairement évités pour les étangs, où la recherche d'un socle imperméable est préférée, si bien que l'on tente au mieux d'imperméabiliser le fond pour éviter les pertes hydrologiques possibles. Il existe cependant des étangs localisés sur source ou sur des résurgences de nappe afin d'obtenir une eau fraîche pour le développement piscicole d'espèces salmonidés dont le préférendum thermique est bas. Pour les lacs, les relations avec la nappe souterraine sont fréquentes. Certaines pièces d'eau lacustres ne dépendent que de l'apport hydrologique de la nappe et l'arrivée d'une eau souterraine peut considérablement modifier le bilan thermique du lac (Kettle *et al.*, 2012). C'est le cas par exemple des *kettle hole lakes*, lacs de culot glaciaire, comme ceux présents au nord-est de l'Estonie, dans la région de Kurtna (Vainu & Terasmaa, 2016). C'est sur ce type de lac que nous allons tenter de mesurer les échanges avec la nappe

pouvant créer potentiellement des modifications thermiques et dissocier des masses d'eau lacustres.

6.3.2.1 Analyses des échanges thermiques avec la nappe au sein du lac Martiska

Les lacs de culot glaciaire de la région de Kurtna font l'objet d'études sédimentaires (Punning *et al.*, 1997, Marzecova *et al.* 2011) et hydrologiques de l'université de Tallinn depuis plusieurs décennies (Punning *et al.*, 1997, Vainu & Terasmaa, 2016). La pression anthropique forte sur ce milieu particulier bénéficiant de la plus grande concentration lacustre du pays a amené à étudier les échanges hydrologiques entre la nappe et les différents lacs dépendant de celle-ci (Vainu & Terasmaa, 2016). C'est dans ce cadre que s'inscrit notre étude, non pas dans le but d'analyser les échanges hydrologiques et ses orientations au sein de la nappe en utilisant les variations de niveau d'eau des lacs, mais d'analyser les effets possibles de l'arrivée d'eau de nappe au sein de deux plans d'eau de la réserve de Kurtna. L'étude est centrée sur les lacs dépendants des arrivées d'eau souterraines et dont la présence peut avoir une influence sur la structure thermique et créer une dissociation verticale et horizontale possible des masses d'eau. Les études des échanges thermiques spatio-temporels en cours d'eau montrent des différences thermiques pouvant être fortes, notamment en été, avec l'arrivée d'une eau latérale plus fraîche de quelques degrés (Wawrzyniak, 2012). La question va être de déterminer l'impact à l'intérieur d'un lac, sur la dispersion de chaleur et son dynamisme global en trois dimensions.

Notre attention se portera plus particulièrement sur le lac de Martiska (profondeur maximale : 7 m, superficie : 3,4 ha) complétée par le lac de Kuradi (Profondeur maximale : 6,5 m, superficie : 1,9 ha) situé 200 mètres au nord du lac Martiska et de morphologie proche.

Le lac Martiska a été sondé à l'aide du CastAway CTD lors de 4 campagnes de terrain s'étalant de mars à novembre, sur les années 2017 et 2018 (pour la mesure du mois de novembre). Le comportement thermique annuel du lac est dimictique avec une stratification directe d'avril à octobre, avant une homothermie automnale puis une stratification inverse pendant l'hiver et une nouvelle homothermie printanière. Lors de la campagne terrain de mars 2017, la couche de glace était de plus de 40 cm, recouverte d'une couverture neigeuse.

Considérant l'arrivée souterraine de l'eau de nappe, et donc via les couches de fond, notre analyse s'est orientée vers une mesure saisonnière afin de mesurer l'influence lors de phases de stratification inverse hivernale, homothermie et stratification directe. Cette dernière est la plus difficile à mesurer puisque la colonne d'eau suit déjà une logique de décroissance de la température de la surface jusqu'au fond. A l'arrivée d'une eau de nappe, aux environs de 6 °C dans ce secteur (Vainu, 2018), celle-ci reste au fond par un jeu de densité et n'influence pas directement la stratification.

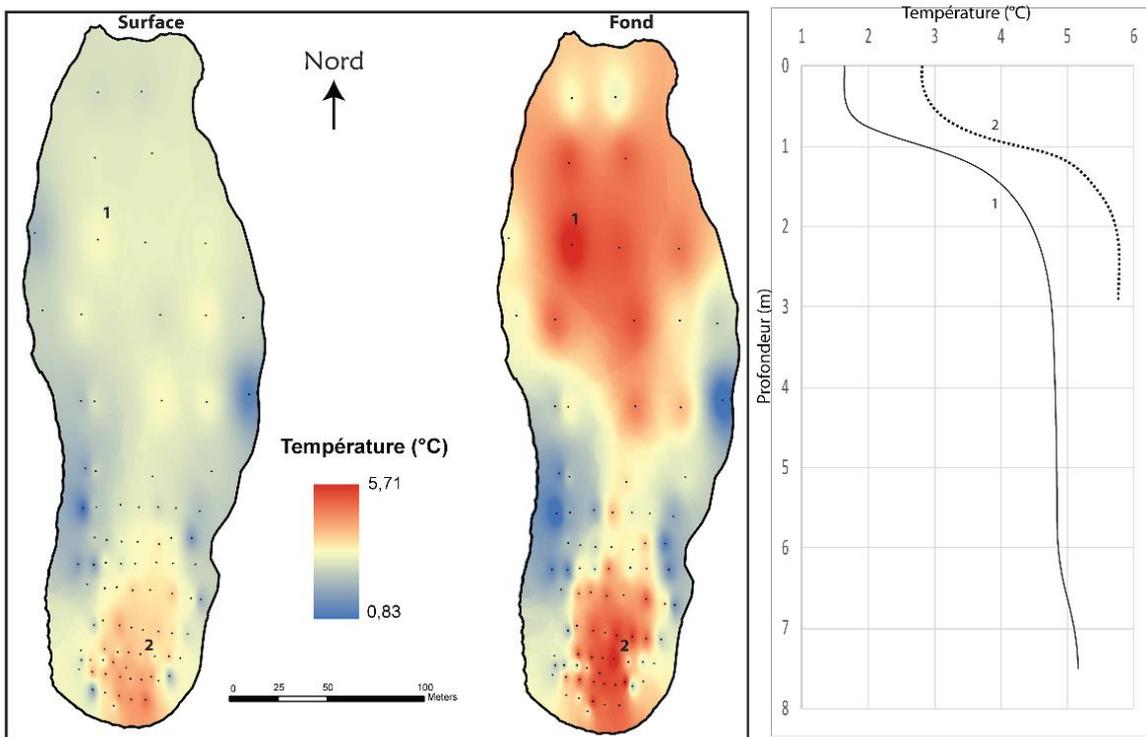
L'influence de la nappe en condition hivernale de stratification inverse

La prise en glace isole le lac des échanges par chaleur sensible ainsi que de la convection forcée par le vent. Les échanges avec l'atmosphère sont réduits et ne procèdent plus que par conduction avec la glace et par radiation (Ragotzkie, 1978). La présence d'une couche de neige augmente l'albédo et va réduire considérablement les apports par radiations courtes. La pénétration de la lumière, et donc de la chaleur, sera réduite voire inexistante. Les échanges principaux par chaleur sensible et radiation solaire étant très réduits pendant la période de prise en glace, les apports secondaires jouent un rôle majeur. Pour le lac Martiska, M. Vainu et J. Terasmaa (2016) ont mesuré différentes zones possibles d'échanges avec la nappe au sein du plan d'eau. La première hypothèse réside dans le fait qu'une part importante des échanges s'effectue dans le bassin sud du lac. Ce bassin, profond d'environ 3 m au maximum serait le lieu d'échanges avec la nappe, et notamment de gain hydrologique pour le lac. La particularité morphologique du lac, composé de deux bassins profonds séparés par un plateau peu profond (environ 1,5m de profondeur) accentue la dissociation possible de masses d'eau.

Lors de l'hiver 2017, le comportement thermique du lac Martiska sous la couche de glace est particulier. La zone au sud est la partie la plus chaude à la surface ainsi qu'au fond. L'eau de la nappe souterraine, mesurée à une température proche de 6°C semble arriver dans le lac par le secteur sud, ce qui confirme les hypothèses des études hydrologiques précédentes (Vainu & Terasmaa, 2016). Dans la partie profonde, au nord du lac, le profil est semblable à celui d'une stratification inverse. En surface sous la glace les températures sont situées entre 1 et 2°C, tandis qu'elles sont plus chaudes, car plus denses, se rapprochant de la température de densité maximale au fond. Or, les couches profondes du lac dépassent cette température de densité maximale, atteignant plus de 5°C (Figure 85). La cartographie

de la température de fond du lac capture ici un phénomène en cours supposé lié à l'arrivée d'eau de nappe, plus chaude, perturbant la température de fond. La cartographie de fond a été préférée ici dans le cadre spécifique des échanges thermiques avec la nappe, opérant principalement dans le fond du lac sinon sur les littoraux.

Les deux bassins les plus profonds, au nord et au sud, sont dissociés par un petit plateau peu profond. Lors de l'hiver, ce plateau ne semble pas subir d'arrivée d'eau souterraine car il conserve une certaine homothermie froide, entre deux et trois degrés, tandis que le reste du lac est en stratification inverse. Ce processus peut avoir d'importantes conséquences sur la dynamique thermique du lac en limitant les échanges entre les différents bassins. Le lac est segmenté en trois masses d'eau distinctes dont les caractéristiques physico-chimiques peuvent différer, notamment liées à l'influence de l'eau de nappe en certains points (Figure 85).



Coupe thermique

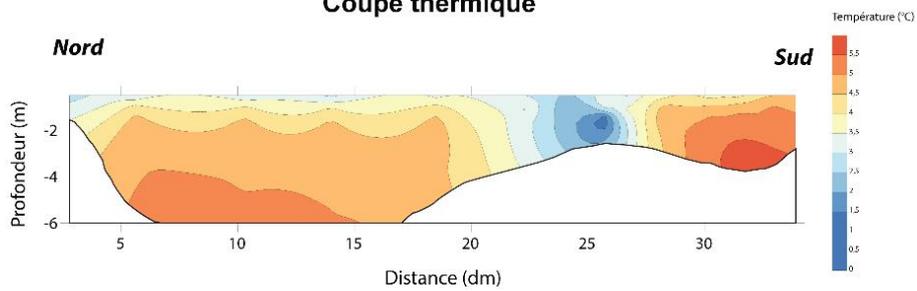


Figure 85: Analyse cartographique des températures de surface et de fond du lac Martiska en hiver. Profils et coupes thermiques. Q. Choffel, 2017

... en période d'homothermie

Lors de la période automnale, les lacs dimictiques connaissent une homothermie de leur colonne d'eau à une température proche de celle de densité maximale, à environ 4°C. Cette homothermie permet les échanges gazeux au sein du plan d'eau, dont notamment l'oxygène indispensable à la vie aquatique et concentré dans les parties supérieures du lac pendant la période de stratification thermique directe. Puisque la totalité de la colonne d'eau est proche de la température de densité maximale et que l'eau est brassée, la température est identique en tout point du plan d'eau.

Le lac de Martiska a également été sondé en période d'homothermie automnale. La partie centrale et nord du lac répond bien aux conditions de brassage automnal, avec une température homogène de la surface au fond de 4,3°C. La totalité du lac est en homothermie, exceptée la partie sud où la température de surface est elle aussi de 4,3°C, mais augmente considérablement au fond pour atteindre 5,4°C à partir de 1,7 m jusqu'au fond (mesuré à environ 3 m (Figure 86)), ce qui témoigne soit d'une instabilité, en mouvement vertical, soit une stabilité permise par une charge en éléments dissous suffisante dans l'apport de nappe. La coupe thermique permet également de mettre en avant la seule zone concernée par une perturbation thermique localisée au sud du lac lors de la journée de mesure.

La partie au sud du lac est donc exposée à des eaux souterraines et les mesures dans cette période peuvent parfaitement le confirmer. A l'inverse, l'hypothèse hivernale concernant la partie la plus profonde au nord n'est quant à elle pas confirmée ici. Seule la partie sud bénéficie de l'eau souterraine à cette période de l'année. Le lac est dissocié en deux masses d'eau distinctes, celle au sud, dont les paramètres physico-chimiques sont influencés par l'hydrogéologie, l'autre au nord et au centre aux caractéristiques lacustres.

La conductivité spécifique mesurée dans la partie sud est de 150 $\mu\text{s}/\text{cm}$, tandis qu'elle est de 110 $\mu\text{s}/\text{cm}$ pour le reste du lac. Cela témoigne de l'influence d'eau de nappe dans la partie sud de l'étang modifiant considérablement la structure physico-chimique du cours d'eau en cette période.

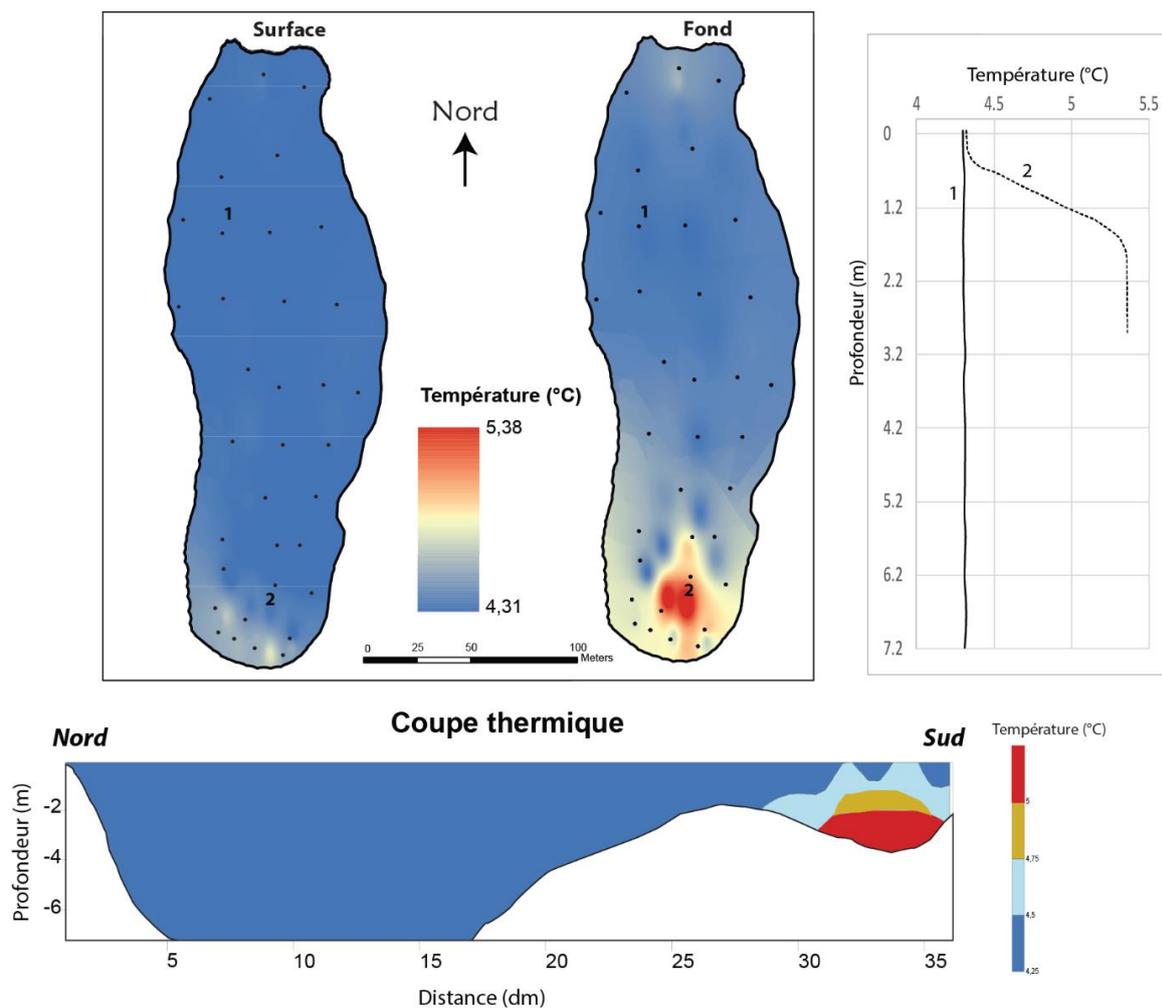


Figure 86: Analyse cartographique des températures de surface et de fond du lac Martiska en homothermie automnale. Profils et coupes thermiques. Q. Choffel, 2017

6.3.2.2 Analyse complémentaire sur le lac de Kuradi

L'arrivée d'eau de nappe localisée en certains points du lac Martiska, le dissociant en plusieurs masses d'eau en certaines périodes, est un phénomène qui se vérifie sur d'autres lacs dépendant également d'apports hydrogéologiques.

En fonction du nombre de sources et de leurs débits, l'influence sera répartie de manière plus ou moins forte au sein du plan d'eau. Pour le lac de Martiska, l'apport par voie souterraine est important et amène à une séparation du lac en masses d'eau distinctes. Pour d'autres plans d'eau, l'influence de la nappe peut être présente mais moindre due à un débit d'eau entrant considérablement réduit par rapport au volume du plan d'eau ou à des caractéristiques physico-chimiques proches de celles du lac. Pour le lac Kuradi par exemple, situé à 200 m au nord de Martiska, l'arrivée d'eau souterraine a également été mise en avant

par les études précédentes (Vainu & Terasmaa, 2016). Cependant, d'après cette étude, la source d'arrivée d'eau souterraine du lac de Kuradi diffère de celle de Martiska.

Sondé en période d'homothermie automnale, le lac de Kuradi a une structure thermique particulière dans sa zone la plus profonde, au centre du lac. Le 12 novembre 2018, l'ensemble du plan d'eau est à la même température exceptée pour une petite partie au centre du lac qui connaît des températures de fond élevées (Figure 87). La partie la plus profonde, réduite à une très faible superficie, a une température dépassant les 5°C de 5,5 m à 7 m de profondeur. La zone inférieure à 5 m environ est influencée par une eau souterraine modifiant la structure thermique du lac. La conductivité est également très élevée en ce point profond, dépassant les 290 $\mu\text{s}/\text{cm}$, contre 50 $\mu\text{s}/\text{cm}$ pour le reste du lac. Les mesures de conductivité spécifique sont très élevées pour ce lac, largement supérieures à celles du lac Martiska voisin.

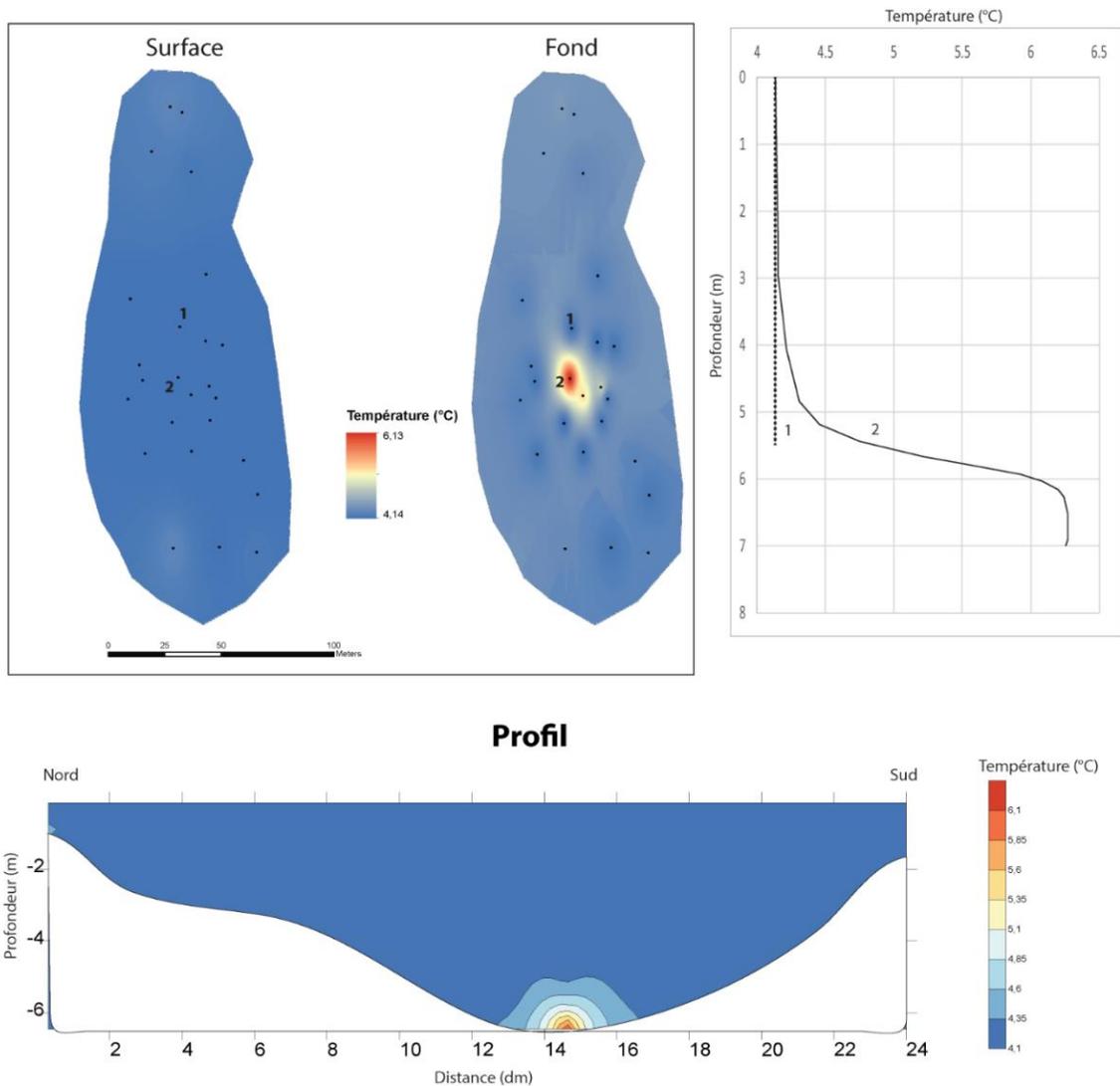


Figure 87: : Carte de conductivité spécifique de surface (gauche) et de fond (droite) du lac Kuradi. Graphique de l'évolution de la conductivité spécifique en fonction de la profondeur- Le 12 novembre 2018. Q. Choffel, 2018

Pour le lac Kuradi, le débit entrant de l'eau de nappe est réduit en cette période (Vainu & Terasmaa, 2016) et touche une partie centrale et profonde du lac. Elle crée une hétérogénéité spatiale de la colonne d'eau, bien que très localisée, dans la zone 5-7 m. Ces mesures permettent également de confirmer l'origine différente des eaux de nappe de Martiska et Kuradi, mise en avant par les précédentes recherches (Vainu & Terasmaa, 2016).

L'arrivée d'une eau de nappe dans un plan d'eau peut-être un discriminant majeur de la dissociation de masses d'eau. L'eau de nappe crée une disparité spatiale de la température des plans d'eau lorsque les sources sont localisées en certains secteurs du lac. Par ses caractéristiques thermiques et physico-chimiques propres, souvent différentes de celles des

milieux lacustres, l'eau souterraine va modifier la structure du lac. Le phénomène est le plus perceptible en hiver ou en automne lorsque le reste du plan d'eau est en homothermie pour l'un ou en stratification inverse pour l'autre. En stratification directe, ces effets sont moins visibles du fait de la superposition des couches et donc de l'arrivée d'eau froide de fond dans les couches déjà les plus froides du lac. En ne prenant des mesures qu'en un seul point, généralement au droit de la plus grande profondeur, on peut avoir des résultats biaisés, soit par l'arrivée d'une eau souterraine à l'image du lac Kuradi, soit, au contraire, par la non prise en compte de cet apport hydrologique modifiant la structure thermique en d'autres secteurs du lac, comme pour le lac Martiska.

Conclusion partie III

L'étude limnocentrée de l'influence de l'étang sur le cours d'eau permet la compréhension des échanges thermiques entre les masses d'eau, perturbées par les conditions météorologiques et la structure thermique de l'étang, selon si celui-ci est en prise d'eau de fond ou de surface. Cette approche nous permet de mesurer les influences thermiques aval de l'étang en fonction de ses phases de stratification, lorsque la chaleur est diffusée en profondeur par les brassages mécaniques, et selon la profondeur de sortie d'eau. L'analyse géographique s'est aussi portée sur la distance d'influence thermique, que celle-ci soit selon la moyenne annuelle ou estivale, ou selon une distance maximale impactée qu'elle atteint ici à 9km environ à l'aval de l'étang de Baerenthal.

L'analyse spatiale des données thermiques lacustres et stagnustres met en avant de nombreuses hétérogénéités. En fonction de la taille du plan d'eau, de sa morphologie, de l'espace environnant et de ses connections hydrologiques, la répartition de la chaleur au sein du plan d'eau peut être perturbée. Pour les grands plans d'eau, l'influence du vent génère des variations de température importantes, pouvant dépasser les 10°C à l'échelle horizontale entre deux secteurs distants de moins d'un kilomètre, mais ils restent ponctuels, liés aux conditions météorologiques. Cependant, de manière simplifiée, la connaissance de l'orientation des vents dominants peut donner une indication des secteurs les plus exposés. Sur les plus petits plans d'eau, une zonation de la température peut également prendre place, liée à l'environnement immédiat par effet d'ombrage malgré la petite superficie en eau. Lorsqu'une partie de l'étang est située en zone ombragée, celle-ci aura une température inférieure à la zone ensoleillée pendant les heures d'ensoleillement maximal, soit entre 11 et 20h environ, régulièrement inférieure de 3°C comparée à la zone ensoleillée de l'étang dans le cas de Rilhac. Des courants de densité ou un mouvement oscillatoire se développent entre les deux bassins, similaire à ceux observés en lac, malgré la très petite superficie de l'étang. Enfin, les paramètres climatiques ne sont pas les seuls facteurs externes pouvant amener à une hétérogénéité spatiale des masses d'eau stagnustres.

L'hypothèse que l'influence de l'arrivée d'eau d'un tributaire entraîne des perturbations sur les étangs plus que sur tout autre plan d'eau, par leur faible volume, n'est pas vérifiée ici. L'entrée d'un tributaire crée une modification de la température et des

caractéristiques physico-chimiques du plan d'eau mais celle-ci est limitée à la zone deltaïque ou à la queue de l'étang. L'effet est similaire pour les arrivées d'eau de nappe localisées en certains secteurs du plan d'eau. Ces apports hydrologiques vont entraîner des perturbations localisées, favorisant la dissociation en plusieurs masses d'eau de l'étang ou du lac.

Cette partie a montré que l'approche limnocentrée permet de répondre à des problématiques de répartition de chaleur entre l'amont et l'aval de l'étang, ainsi qu'au sein même du plan d'eau. La prise en compte des volumes d'eau permet d'évaluer l'influence réelle de l'étang vers le cours d'eau aval et ainsi de comparer et différencier les impacts des petits étangs de ceux des grands étangs volumiques. A l'échelle du plan d'eau, il a été démontré que, en fonction de la morphologie des plans d'eau et des forçages externes, la zonation de la température sera plus ou moins localisée et sa temporalité plus ou moins longue. Mais que cette hétérogénéité peut se développer pour tout type d'étang, du grand multilobé au petit arrondi de moins d'un hectare. La connaissance des variations spatiales de la température amène à la question de quantification de ces écarts thermiques.

C'est pourquoi la dernière partie abordera la mise en place d'un indicateur capable de cartographier et mesurer ces écarts de température et de structure thermique au sein des masses d'eau de l'étang.

**Partie IV : L'apport de l'analyse spatiale et du bilan
thermique dans l'étude des échanges calorifiques et dans
la gestion thermique des plans d'eau**

Les études de bilan thermique d'un lac à partir du quadrillage de celui-ci sont très rares, avec quelques exceptions comme pour le lac Ladoga (Naumenko *et al.*, 2000, Timofeeva, 2010⁴⁷), l'étude d'une baie du lac Ontario (Rueda & Cowen, 2005) ou le lac chinois de Taihu pour le calcul du bilan énergétique (Wang *et al.*, 2014). Or, la prise en compte de plusieurs profils verticaux au sein du même plan d'eau améliore la précision de calcul du bilan thermique (Touchart, 2016, Abbasi *et al.*, 2016). L'étude de la variation spatiale de la température au sein de trois étangs a mis en avant l'importance de la prise en compte de la composante horizontale dans les échanges thermiques.

L'analyse spatiale du bilan thermique peut apporter des éléments de réflexion sur la répartition de chaleur au sein d'un plan d'eau. Elaboré pour les mesures sur une colonne d'eau, le bilan thermique n'est cependant pas l'indicateur le plus efficace lorsque l'on intègre les données spatiales. Afin de permettre de quantifier l'évolution spatiale de la température, de sa structure thermique et de l'ensemble des paramètres physico-chimiques, il est nécessaire de créer un nouvel indicateur. Ce dernier, le centre thermique, vise à apporter une originalité dans l'analyse de la zonation thermique des plans d'eau en trois dimensions n permettant d'ouvrir la réflexion vers de nouvelles perspectives de gestion. Par ses apports, le centre thermique peut répondre à un besoin croissant de connaissance du milieu stagnustre, notamment pour les gestionnaires, afin de préserver ces milieux et leur qualité, tout en limitant l'impact thermique sur le cours d'eau aval.

Après avoir montré une forte variation de température au sein de l'étang, le questionnement principal de cette partie 4 est le suivant : Comment mesurer et cartographier l'hétérogénéité spatiale de température au sein d'un plan d'eau ? Nous répondrons à ce problème par la création d'un nouvel indicateur, le centre thermique, et son application pour la gestion des plans d'eau.

Nous tenterons dans un premier temps de créer un nouvel indicateur, le centre thermique, à partir du centre de gravité d'un plan d'eau, développé par Schmidt (1928), en y intégrant les données dans la dimension spatiale. Dans un second temps, nous proposerons des éléments de gestion pour les étangs, à partir de la prise en compte des données de température en plusieurs points du plan d'eau et du centre thermique, afin de tenter de

⁴⁷Cités par Touchart, 2016

favoriser une gestion cohérente de l'étang d'un point de vue thermique, tout en limitant son risque de diffusion de chaleur vers l'aval.

Dans un septième chapitre, nous souhaitons intégrer la composante horizontale dans le calcul du bilan thermique à partir de méthodes basées sur la température moyenne ainsi que sur le calcul de différents bassins délimités. Cette approche permettra de mettre en avant la limite du bilan thermique dont les marges d'erreurs peuvent être liées à la variation spatiale de la température, et au besoin de création d'une méthode afin de quantifier et cartographier ces variations spatiales, ce qui conduira au nouveau centre de gravité par pondération thermique d'un plan d'eau, appelé centre thermique. Ce dernier sera analysé pour trois étangs dans son évolution longitudinale, latitudinale et de profondeur, afin d'étudier les facteurs externes capables de modifier la structure thermique en trois dimensions de l'étang et ainsi mesurer l'influence des conditions météorologiques sur le milieu stagnestre.

Il sera question ensuite, dans un huitième et dernier chapitre, de s'attarder à la fois sur des questions de gestion des milieux stagnestres, par l'apport de l'analyse en trois dimensions, ainsi que sur des discussions vis-à-vis de l'aspect horizontal dans les politiques de gestion des étangs, élargie aux plans d'eau en général. Dans le début de ce chapitre, nous discuterons de la gestion des étangs afin de limiter l'impact thermique à l'aval, notamment par l'analyse du centre thermique, et également au sein de l'étang afin de valoriser la biodiversité ou les espèces piscicoles présentes en étang. Nous terminerons ce chapitre par deux réflexions, la première apportera une discussion sur l'apport de l'analyse spatiale afin d'améliorer les mesures physico-chimiques en étang. La seconde est orientée sur la question du seuil des 50 ha proposé par la DCE afin de différencier les masses d'eau cours d'eau de celles des masses d'eau plans d'eau, seuil fortement critiqué dans la littérature scientifique (Bartout, 2015, Roubéix *et al.*, 2018) et ainsi analyser à partir des données collectées, si la superficie est un élément de dissociation des masses d'eau ou s'il existe des éléments morphologiques ou morphoclimatiques plus cohérents.

Chapitre 7 : Le centre thermique, nouvel outil de quantification de l'hétérogénéité spatiale des masses d'eau

7.1 D'un bilan thermique spatialisé à la création du centre thermique

La grande majorité des mesures en limnologie est effectuée sur une seule verticale, généralement au droit de la plus grande profondeur postulant leur relative uniformité en plan (Forel, 1892, Birge, 1915, Hutchinson, 1957, Ragotzkie, 1978, Wetzel, 1983, Goldman & Horne, 1983, Geller, 1992, Ambrosetti & Barbanti, 2001, Touchart, 2002, 2016). Or, pour les petits plans d'eau, peu profonds et avec un fetch réduit, l'hypothèse d'une température homogène peut produire d'importantes erreurs dans les résultats de modélisation (Abbasi *et al.*, 2016) ou de calcul du bilan thermique. Des études sur les grands lacs, comme le Léman par Soullignac *et al.* (2017) mettent en avant le fait que la variation spatiale des indicateurs écologiques peut amener à des erreurs de classification de l'état écologique du plan d'eau. Deux problèmes sont en fait à résoudre. Le premier porte sur la distance qui existe entre le centre géométrique du plan d'eau et le point le plus profond. La seconde question concerne la représentativité du centre géométrique, qui pourra être discutée et conduire à la création d'un nouvel indicateur, le centre thermique. Dans le cas de barrages, qu'ils concernent des lacs naturels, des lacs artificiels ou des étangs, le premier problème connaît son paroxysme. Dans le cas d'une sortie d'eau artificielle, l'enjeu du fonctionnement interne du plan d'eau se double de celui de la qualité de la masse d'eau qui alimente l'émissaire de sorte qu'elle puisse être plus ou moins contrôlée par l'homme, qui a la capacité, dans certains aménagements hydrauliques, de sélectionner en partie la masse d'eau souhaitée. L'étang est justement un plan d'eau cumulant tous ces problèmes.

7.1.1 Apport d'une approche spatiale dans le bilan thermique

Les recherches de Birge sur les lacs de la région de New-York montrèrent que les écarts de calcul du bilan thermique entre les mesures au point central et ceux du littoral ne dépassent jamais les 5 % (Birge, 1915) tandis que Wedderburn (1907) trouva un écart moyen entre le littoral et le large de moins de 3 % sur le Loch Ness en Ecosse. En reprenant ses travaux, Birge expliquera « *But in the present state of our knowledge of lakes, a possible*

variation of 3 % or 5%, or even a larger error, does not render an observation « futile⁴⁸ » for purposes of general discussions. » (Birge, 1915, p.178). Des écarts de température existent au sein d'un lac, entre des bassins plus frais dans le Léman (Milon, 1929, Soullignac, 2017) ou encore dans les lacs suédois (Melin, 1939). Ce dernier auteur avait émis la probabilité de fonctionnement différent des trois bassins séparés par une passe étroite, pouvant être comparés à trois lacs distincts (Melin, 1939, p.10). Cette vision a été développée à nouveau par L. Touchart (2001) et la notion de régions limniques présentes au sein d'une même entité lacustre.

Les plans d'eau de barrage ont une morphologie complexe pouvant développer des bassins à fonctionnement autonome ou des disparités liées à la présence d'un tributaire. Il a été démontré dans les parties précédentes que l'étang pouvait développer une forte hétérogénéité thermique, à la surface ainsi que dans ses strates profondes. La zone la plus profonde est généralement située à la chaussée, excentrée du centre de gravité du plan d'eau. En ce sens, on peut se questionner sur l'effet de cette variation spatiale de la température sur le calcul du bilan thermique stagnustre au point le plus profond.

En s'appuyant sur une étude spatialisée du bilan thermique, la première étape consiste à comparer les apports d'une méthodologie basée sur la variation spatiale face à celle traditionnelle située au point le plus profond. Dans cette thèse, nous souhaitons remettre en avant l'intérêt de l'étude spatialisée du bilan thermique, induite par l'expansion du champ de recherche aux plans d'eau de barrage.

7.1.1.1 L'utilisation de la moyenne des températures comme première étape vers un bilan thermique spatialisé

La première étape, la plus évidente et facilement réalisable, est la prise en compte des températures moyennes en plusieurs points de l'étang dans le calcul du bilan thermique. En chaque strate, la moyenne des températures à chaque point de mesure sera multipliée par le volume d'eau. Les résultats obtenus sur l'étang de la Ramade montrent un écart moyen des valeurs absolues entre BT1 (méthode traditionnelle) et BTmoy de 2,89 %. Ces valeurs sont proches de celles trouvées par Birge (1915) et Wedderburn (1907). La prise de mesure en continu permet de mesurer les écarts maximums ponctuels et d'analyser les phases où

⁴⁸La notion de « futile » est ramenée ici aux critiques de Wedderburn sur la méthodologie de calcul du bilan thermique de Forel en un seul point du lac.

les écarts sont importants. L'écart maximum enregistré est de +11,52 % le 1^{er} juin 2016 à 6h. Il correspond au refroidissement important de la partie nord de l'étang, présenté dans le chapitre III. 6.2.1.2. A ce moment de la journée, la prise de mesure à l'endroit de la chaussée augmente le bilan thermique de plus de 10 %.

La méthodologie de calcul utilisant les moyennes de température de l'étang permet de limiter les écarts dus à l'éloignement de la chaussée de certains secteurs de l'étang. Cependant, ces moyennes elles-mêmes ne sont pas parfaitement exactes, car on ne tient pas compte des écarts de bathymétrie au sein de l'étang. Les strates de la colonne d'eau au point le plus profond sont multipliées par une température moyenne qui n'est en quelque sorte pas pondérée. Or, certains bassins ont une profondeur maximale réduite, inférieure à la moitié de celle de la zone profonde. Dans le cas des strates les plus profondes, seules une ou deux températures sont prises en compte.

2.2.4.18 L'analyse séparée des bassins en régions limniques

La deuxième étape dans l'analyse du bilan thermique spatialisé est le calcul du bilan thermique de chaque bassin, selon sa bathymétrie, et l'addition de l'ensemble des bilans thermiques afin d'obtenir un bilan thermique complet, nommé BTa. Cette méthodologie nécessite un découpage de l'étang en plusieurs bassins (III.6.1.1). Le calcul du bilan thermique en chaque bassin est une méthodologie plus complète que la prise en compte des moyennes de températures en plusieurs points de l'étang. Cette dernière ne permet pas de résoudre l'influence des couches profondes, où les données thermiques de fond sont réduites à la bouée au point le plus profond, car la seule capable d'obtenir ces valeurs. Chaque bouée étant à une profondeur différente, le calcul et la prise en compte du volume sont nécessaires.

BTa est la méthode de calcul englobant les particularités bathymétriques de l'ensemble de l'étang, et permet donc avoir une estimation de la contenance calorifique plus proche de celle de la colonne d'eau profonde.

7.1.1 Comparaison des méthodes de calcul

La méthode de calcul traditionnelle (BT1) au point le plus profond de l'étang a été comparée à l'addition des calories de chaque bassin de l'étang (BTa). La seconde apporte la composante spatiale au bilan thermique et englobe l'ensemble des échanges calorifiques au sein du plan d'eau.

A titre d'exemple, le 5 mai 2016 à 19h, la contenance calorifique BT1 de l'étang de la Ramade était de $1,28^{E13}$ calories ($2\ 076\ \text{cal/cm}^2$), alors que celles des quatre bassins étaient respectivement de $2,65^{E12}$ calories ($3\ 236\ \text{cal/cm}^2$) pour le point le plus profond, $3,89^{E12}$ calories ($2\ 246\ \text{cal/cm}^2$) pour la partie centrale, $1,69^{E12}$ calories ($1\ 605\ \text{cal/cm}^2$) dans le bassin ouest et $2,78^{E12}$ calories ($1\ 362\ \text{cal/cm}^2$) dans le bassin nord, si bien que, selon le mode de calcul BTa, la contenance calorifique était de $1,10^{E13}$ calories ($1\ 883\ \text{cal/cm}^2$).

Sur le plus grand des trois étangs étudiés, l'étang de la Ramade, l'écart moyen résultant des deux méthodes de calcul est de + 2,85 % sur l'année 2016, il augmente à 3,35 % lorsque l'on prend en compte les valeurs absolues. Des écarts plus importants ont été mesurés ponctuellement avec un maximum positif à 14,42 % et un maximum négatif à -7,9 % de marge d'erreur. Sur les étangs de plus petite taille, l'écart entre les deux méthodes de mesure du bilan thermique est plus réduit. Sur l'étang de Baerenthal, l'écart oscille entre -5 et 5 %, tandis qu'il est réduit à -2 et 2 % sur le petit étang de Rilhac. D'après les résultats sur les trois étangs étudiés il apparaît que, plus la superficie est importante, plus la mesure en un seul point du plan d'eau peut amener à des écarts importants. En revanche, les petits étangs de moins d'un hectare sont tout de même concernés par ces écarts spatiaux de mesure du bilan thermique.

Analyse approfondie des marges d'erreur du calcul du bilan thermique sur l'étang de la Ramade

Parmi les trois étangs, nous avons choisi d'étudier plus précisément l'étang de la Ramade, dont les écarts sont les plus significatifs. A volume d'eau égal, la mesure du bilan thermique au point le plus profond à la chaussée est globalement supérieur à celui de l'ensemble du plan d'eau, mesuré en 4 points distincts. En homothermie verticale, les écarts sont réduits, des marges d'erreur peuvent exister lorsque l'action du vent déplace les calories en certains points, entraînant une hétérogénéité spatiale. En phase de stratification, les écarts sont les plus importants en moyenne, avec des périodes dépassant les 7 à 8 % pendant plusieurs jours. Les phases d'augmentation et de diminution du pourcentage d'erreur entre

les deux méthodes suivent celles de la stratification thermique (Figure 88). Les phases d'homothermie verticales sont moins propices à l'hétérogénéité de la répartition des calories du plan d'eau.

La plus grande profondeur de la colonne d'eau à la chaussée lors du calcul de BT1 implique une diffusion de chaleur vers le fond supérieure au reste de l'étang. Les zones peu profondes ont un stockage calorifique limité par les quelques centaines de centimètres de profondeur.

Les plus forts écarts sont mesurés lors de phases ponctuelles, principalement liées à l'action du vent sur la surface de l'eau. Un vent d'orientation nord va entraîner une diffusion des calories vers le sud et donc apporter de la chaleur dans la zone de mesure de BT1, augmentant la contenance calorifique à la chaussée.

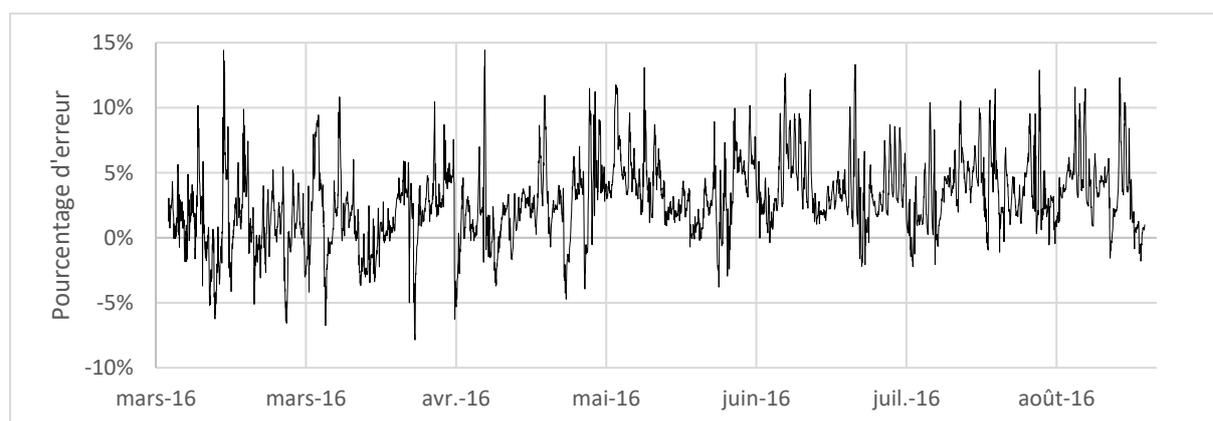


Figure 88: Évolution du pourcentage d'erreur entre la méthode traditionnelle (BT1) et son nouveau spatialisé (BTa). Étang de la Ramade mars à septembre 2016. Q. Choffel, 2017

Par l'action mécanique du vent, la rive sous le vent va perdre des calories tandis que la rive au vent en gagnera. Lors de ces phases, la perte calorifique est quasi nulle⁴⁹ pour l'ensemble de l'étang, mais la variation spatiale peut induire de fortes pertes en certains secteurs.

Ces écarts spatiaux montrent la complexité de mesure du bilan thermique en un seul point de l'étang, réagissant rapidement aux forçages externes et développant une hétérogénéité spatiale importante malgré sa petite taille. Sur l'étang de la Ramade, les écarts entre les deux méthodologies sont avant tout liés aux variations de température des deux

⁴⁹Bien qu'il puisse évidemment avoir des pertes par augmentation de l'évaporation par l'action du vent, selon la théorie de Dalton.

bassins aux plus forts volumes, le bassin central et celui à la chaussée (Figure 89). Le 19 juillet 2016 par exemple, sur l'étang de la Ramade, le vent de sud-sud-ouest cause un écart thermique important entre les bouées au centre et à la chaussée. Les eaux chaudes de la chaussée sont poussées vers le nord, à l'origine d'un écart calorifique ponctuel d'environ 150 cal/cm² entre la bouée 1 et 2. Cet écart se traduit par un pourcentage d'erreur de la méthode traditionnelle de -8 % environ, sous-estimant la contenance calorifique globale de l'étang dans sa mesure traditionnelle. A l'inverse, les jours précédents un vent de nord amenait les calories vers le sud et induisait un écart calorifique entre les deux secteurs de l'étang en faveur de la zone à la chaussée (Figure 90). C'est dans ces périodes que le bilan thermique à la chaussée est surestimé en comparaison du reste de l'étang.

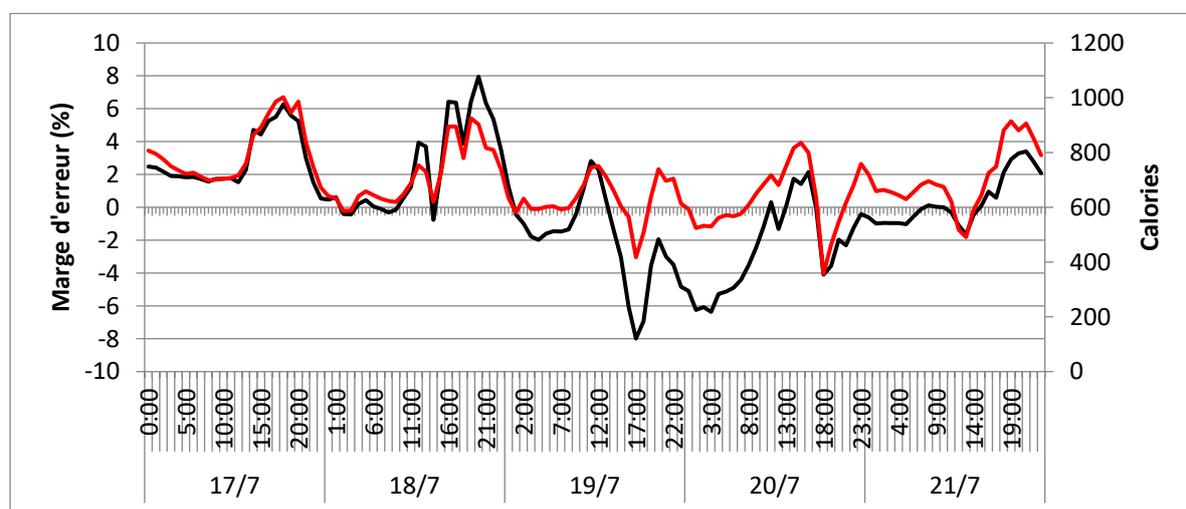


Figure 89: Marges d'erreur (noir) et soustraction des contenances calorifiques brutes entre B1, à la chaussée, et B2, au centre (rouge) sur l'étang de la Ramade du 17 au 21 juillet 2016. Q. Choffel et al., 2017

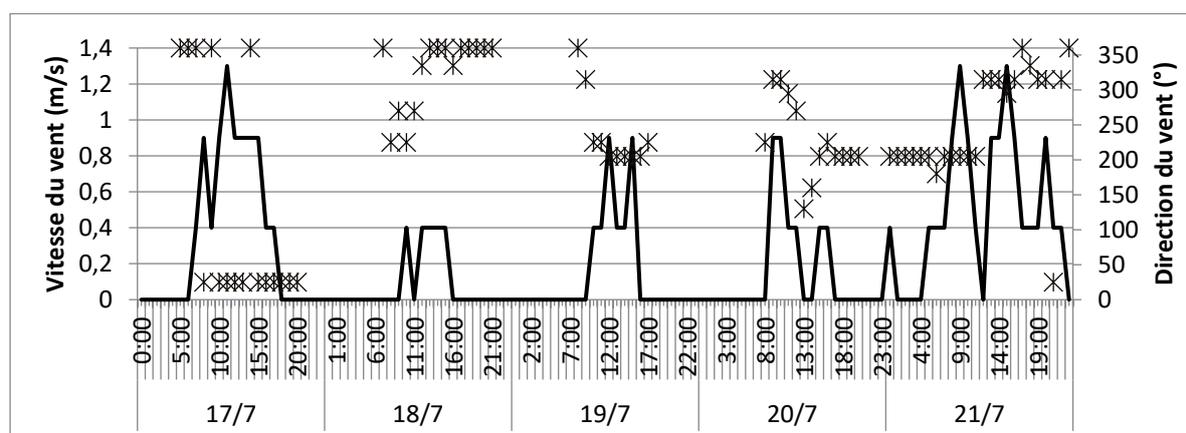


Figure 90: Vitesse (courbes) et direction (étoiles) des vents au-dessus de l'étang de la Ramade, du 17 au 21 juillet 2016. Q. Choffel et al., 2017

Les écarts dans les calculs entre un bilan thermique spatialisé et un traditionnel peuvent être ponctuellement forts, avec des variations de plus de 10 % de manière assez fréquente. Ces écarts sont avant tout liés au fonctionnement thermique interne du plan d'eau et au forçage externe par le vent. Les écarts dépendent de la structure thermique du plan d'eau, notamment liés aux phases de stratification. Il est donc d'autant plus important en moyenne durant l'été, période favorable aux stratifications thermiques.

La méthode spatialisée permet d'intégrer la dynamique globale du plan d'eau, soit les écarts thermiques induits par les forçages externes ou le fonctionnement thermique interne. Les zones de l'étang au-dessus d'une colonne d'eau profonde et celles surmontant une colonne d'eau peu profonde ont des dynamiques parfois différentes et leurs écarts de profondeur engendrent des différences dans la capacité de stockage et de restitution des calories dans la colonne d'eau. Le bilan thermique spatialisé permet d'apporter plus de précisions dans les mesures ponctuelles en plan d'eau et principalement pour les plans d'eau multilobés, à formes complexes, et dont le point le plus profond est éloigné du centre géométrique. C'est le cas des plans d'eau de barrage, qu'ils soient étangs ou lac, les parties excentrées formant des baies ou un littoral peuvent avoir des fonctionnements autonomes, rendant le calcul du bilan thermique en un seul point peu représentatif. L'utilisation d'un bilan thermique spatialisé permet d'apporter des connaissances supplémentaires, prenant en compte les échanges internes à la masse d'eau et les particularités bathymétriques.

Variation spatiale de la structure thermique et stabilité de l'étang

La variation spatiale du bilan thermique synthétise les échanges de chaleur au sein de l'étang, liés aux écarts de température mais aussi aux écarts de structure thermique. En fonction de la profondeur de la colonne d'eau et des forçages externes, la variation verticale de température, exprimée par la stabilité, va différer en plusieurs points de l'étang.

La prise de mesure au point le plus profond, à la chaussée, donne une indication de la stabilité du plan d'eau en ce secteur, soit une idée du maximum théorique de stratification (Figure 91). La morphologie de certains étangs, à l'image de celui de la Ramade avec de grands bassins peu profonds et une zone profonde réduite, ne permet pas une représentativité de la stabilité du point le plus profond à l'ensemble de l'étang. La partie au nord, de profondeur maximale de 1,5 m connaît des phases de stratifications différentes de

celles du reste de l'étang, ainsi qu'une stabilité plus faible, avec des fortes variations ponctuelles (Figure 91, « Bassin nord »). Ce bassin semble avoir un fonctionnement autonome et va donc augmenter les écarts de bilan thermique par de possibles écarts de température, mais principalement par des différences de fonctionnement thermique. L'alternance des phases de stratification et de brassage sont plus courtes sur le bassin nord, réduites à quelques jours au maximum, mais sont ponctuellement élevées et atteignent en ce secteur le maximum de stabilité ponctuel de l'étang.

Les trois autres secteurs étudiés ont une dynamique similaire avec des phases de stratifications sur plusieurs jours, légèrement plus courtes sur le bassin ouest (Figure 91, « Bassin ouest »). Celui-ci étant le moins profond des trois, il est plus sensible aux forçages externes agissant sur le plan d'eau et capables de brasser la colonne d'eau plus rapidement.

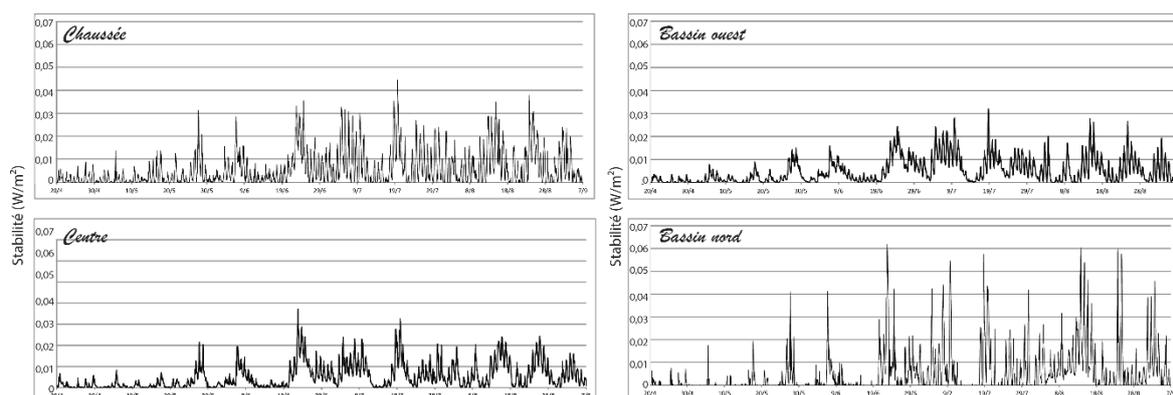


Figure 91: Variations horaires de la stabilité (en W/m^2) en plusieurs points de l'étang de la Ramade

La prise en considération de la variation du bilan thermique, et pas seulement de la température, apporte une vision complète du fonctionnement d'un plan d'eau. L'intégration du volume stagnante ou lacustre définit le fonctionnement de la colonne d'eau, une phase de stratification ou de brassage n'apporte pas les mêmes résultats calorifiques. Lorsque certaines zones sont en phase de stratifications directes, une autre partie de l'étang peut être en homothermie induisant des écarts de bilan thermique conséquents.

L'analyse spatiale définit le besoin de prendre en compte le bilan thermique de plusieurs secteurs de l'étang en effectuant une moyenne des bilans thermiques. Cette

solution s'avère la plus intéressante dans un premier temps, mais n'offre cependant aucune indication des forçages internes ou externes et des zones exposées amenant à cette hétérogénéité. Afin d'approfondir ces connaissances sur le fonctionnement en trois dimensions d'une masse d'eau, la création d'un nouvel indicateur peut répondre à ce besoin.

7.2 Le centre thermique, nouvel outil d'analyse de l'évolution spatio-temporelle du bilan thermique d'un plan d'eau

A partir des données de bilan thermique et de stratification des masses d'eau, nous souhaitons développer ici la notion de centre thermique d'un plan d'eau, d'une part en prenant en compte non seulement la profondeur mais aussi les deux dimensions horizontales, et d'autre part en exprimant les températures plutôt que la densité qu'elles provoquent. En effet, l'objectif ici n'est pas de travailler sur la stabilité de l'étang et de quantifier l'énergie qu'il faut au vent pour détruire la stratification thermique (Birge, 1915, Schmidt, 1928), mais de valoriser une démarche spatiale permettant de cartographier les isothermes et les discontinuités thermiques, dont la thermocline.

7.2.1 Méthodologie d'élaboration du centre thermique

7.2.1.1 Une méthode basée sur le centre de gravité d'un plan d'eau

Lors de mesures de stabilité de la colonne d'eau, Schmidt a démontré l'importance de l'analyse du centre du volume d'un plan d'eau (Schmidt, 1928). Celui-ci dépend du volume de chaque couche verticale ainsi que de leur densité. Les travaux d'Eckel reprennent largement ceux de Schmidt, en développant cette notion de « *geometrischer Schwerpunkt des Seebeckens* » (Eckel, 1950, p.38) pour le calcul de stabilité. Le centre de volume évolue en « *centre de gravité* » dépendant des écarts de densité entre un épilimnion et un hypolimnion (Dussart, 1966, p.158). En phase d'homogénéité thermique, soit lorsque l'ensemble de la colonne d'eau est à la même température, le centre de gravité est situé à mi-distance entre la surface et le fond. Lors de l'élaboration d'une stratification thermique, l'eau de surface se réchauffe et un gradient se forme entre la surface et le fond. Le centre thermique va alors s'approfondir et se diriger vers l'hypolimnion, plus dense (Dussart, 1966). Birge et Juday, en 1914, avaient déjà analysé ce phénomène, en le nommant différemment, préférant le « *Center of oscillation of the water* ». Ils l'utilisèrent cependant à des fins thermiques et non dynamiques comme son nom pourrait laisser prétendre, en indiquant : "It is fair to conclude that the mean temperature of the water of a lake of simple form may

be derived from a single series of observations taken at or near the center of oscillation of the water.” (Birge & Juday, 1914, p. 558).

La première formule de Schmidt (1928) permet le calcul du centre volumique du plan d’eau, soit le point situé au centre d’un volume. La formule requiert la connaissance bathymétrique du plan d’eau dans le détail, soit la superficie et la profondeur de chaque couche, ainsi que leur densité :

$$(9) \quad Zv = \int_0^{Zd} zAz\partial z / \int_0^{Zd} Az\partial z$$

Avec z : profondeur, zm : profondeur maximale, fz : superficie de la couche à la profondeur z : densité à la profondeur z.

Le calcul du centre de gravité de Schmidt est une analyse dans la composante verticale, se concentrant sur l’évolution de la densité en profondeur. Il apporte une connaissance sur la position du centre de densité lié aux volumes de l’épilimnion et l’hypolimnion, ainsi que de leur densité. Dans sa composante verticale, son utilisation classique montre des oscillations en fonction des phases de stratification et de brassage (Figure 92). Il s’apparente logiquement aux valeurs de la stabilité.

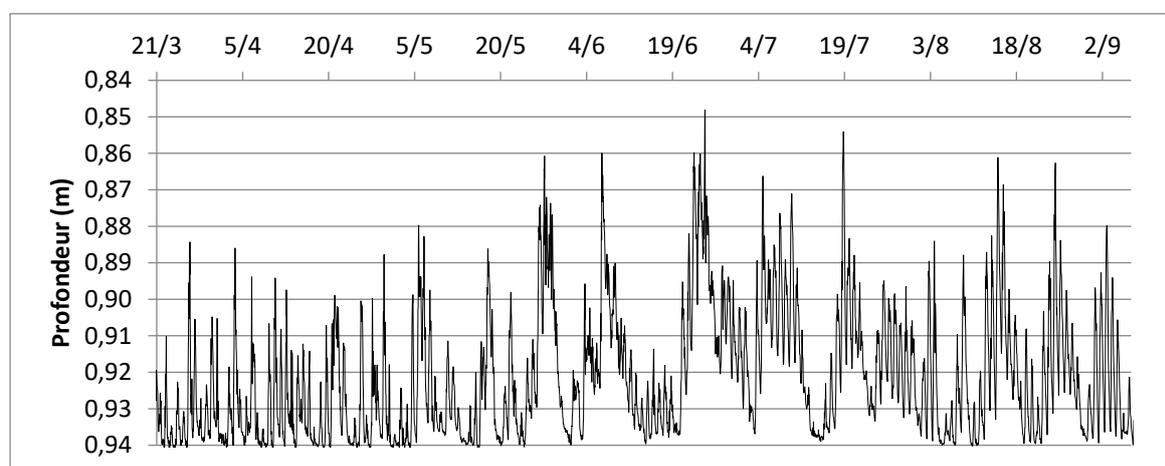


Figure 92: Exemple d’évolution du centre de gravité d’un étang en fonction du temps, à l’échelle verticale. Etang de la Ramade, du 21 mars au 14 septembre 2016

Méthode de calcul du centre thermique

La principale nouveauté du centre thermique réside dans l’utilisation de l’échelle spatiale horizontale au sein du plan d’eau. L’objectif est de passer d’un centre de gravité,

exprimé en 2D à un centre thermique en 3D, préférant la température et le bilan thermique à l'évolution de la densité.

Nous avons choisi d'intégrer les données de profondeur de la thermocline et celles du centre de gravité afin d'avoir un aperçu complet de l'évolution du centre thermique dans sa verticalité dans un premier temps, mais lié à la dynamique de l'ensemble de l'étang et non pas en un seul point. La méthodologie utilisée inclut le calcul, en chaque point du plan d'eau, de la position de la thermocline par rapport à celle du centre de gravité. Les résultats en chaque point sont regroupés en une seule valeur, soit la donnée z du centre thermique. L'objectif est de mesurer les écarts de position de la thermocline entre chaque point du lac.

Le calcul a été effectué aux échelles latitudinales et longitudinales. Il intègre la valeur des bilans thermiques, préférée à la valeur initiale des volumes, soit une multiplication du volume par la température. En effectuant le calcul en chaque point de mesure du plan d'eau dans les deux composantes horizontales et verticales, on obtient les variations spatiales de la contenance calorifique. Le centre thermique permet de mesurer les échanges de chaleur au sein d'un plan d'eau. La formule de calcul, si l'on dispose de quatre bouées, est la suivante :

$$X = \frac{Bt1 * X1 + Bt2 * X2 + Bt3 * X3 + Bt4 * X4}{Bt1 + Bt2 + Bt3 + Bt4}$$

(12)

$$Y = \frac{Bt1 * Y1 + Bt2 * Y2 + Bt3 * Y3 + Bt4 * Y4}{Bt1 + Bt2 + Bt3 + Bt4}$$

$$Z = \frac{(Pt1 + Pt2 + Pt3 + Pt4)}{N}$$

Avec BT : Bilan thermique (le nombre indiquant le numéro des bouées), X : position longitudinale, Y : position latitudinale, Pt : Profondeur de la thermocline, N : nombre de chaînes de mesures

Le calcul de la variable Z de profondeur du centre thermique est la moyenne des profondeurs des thermoclines aux différents lieux de mesure. Cet outil permet de comprendre la position de la thermocline en prenant en compte sa composante spatiale. L'accumulation de chaleur se situe, dans la composante verticale, au-dessus de la

thermocline formant le plan de décroissance maximale de température selon la profondeur. Les profondeurs du plan de convection maximale de température ont été simulées sur le logiciel RlakeAnalyzer utilisant une méthode permettant d'estimer la localisation de la thermocline à partir d'un profil thermique, même entre deux mesures thermiques (Read *et al.*, 2011, Winslow *et al.*, 2018). Les auteurs ont élaboré une formule afin de pondérer les amplitudes de calcul de densité entre les points de mesures, et ainsi calculer une profondeur de la thermocline entre les mesures discrètes (Read *et al.*, 2011, p.2). Cette méthodologie permet d'apporter plus de précisions dans la localisation de la thermocline et donc dans le calcul du centre thermique.

Le centre thermique est un outil de compréhension spatialisé des échanges calorifiques au sein d'un plan d'eau. Cet outil vient compléter ceux basés sur des écarts de densités, en 2D, en apportant une dimension spatiale. Pour les étangs, le centre thermique prend tout son sens du fait de la variation rapide de la contenance calorifique à la fois aux échelles temporelles et spatiales. Le possible choix de localisation de sortie d'eau au niveau de la chaussée, dans sa composante verticale, peut être appuyé par le CT. Il en est de même si de fortes variations horizontales engendrent des écarts thermiques conséquents. La localisation appropriée de la chaussée pourrait permettre une réduction de l'impact thermique de l'étang sur le milieu aval récepteur.

7.2.2 La quantification de l'hétérogénéité spatiale à l'aide du centre thermique

7.2.2.1 Evolution temporelle du centre thermique d'étangs

Au même titre que le bilan thermique, l'évolution du centre thermique dépend des conditions météorologiques et de la structure thermique de l'étang. En période hivernale, les variations du CT sont globalement faibles, les homothermies verticales hivernales étant souvent synonymes d'homothermies dans la dimension horizontale également, entraînant un centre thermique proche du centre de gravité. L'homothermie des étangs de novembre à mars est caractérisée par une faible variation du CT, quasi stable sur cette période. L'évolution est cyclique de manière générale, avec des écarts maxima au printemps et à l'été, là où le réchauffement de l'eau provoque des hétérogénéités spatiales. Certaines variations majeures peuvent être mesurées en hiver, lorsque l'étang est en stratification inverse.

Dès le début du printemps, la répartition de chaleur va être moins uniforme et entraînera des écarts importants de bilan thermique des différents secteurs du plan d'eau. Le réchauffement rapide de l'eau par la température de l'air et la radiation solaire permet un emmagasinement de chaleur, mais la faible stabilité de la colonne d'eau génère des écarts de stratification et de température entre les bassins consécutifs. Les amplitudes de variation du centre thermique peuvent être les plus fortes en cette période, où l'action du vent sur une colonne d'eau peu stable peut rapidement déplacer la chaleur vers un secteur du plan d'eau. Ces écarts sont cependant ponctuels, dépassant rarement la journée.

Les variations du CT sont les plus conséquentes et durables durant la période estivale. A cette période, les fortes températures de l'eau entraînent des stratifications importantes de la colonne d'eau, plus difficilement destructibles par la convection forcée. Les influences du vent et de la bathymétrie se feront d'autant plus ressentir sur le plan d'eau.

7.2.2.2 Evolution comparée du centre thermique de trois étangs

La morphologie du plan d'eau, le découpage du trait de côte, la taille et l'environnement direct sont autant d'éléments pouvant créer une certaine hétérogénéité spatiale de la température de l'eau et de sa capacité à se stratifier. Le bilan thermique ne pouvant pas mesurer et quantifier les variations spatiales de température en trois dimensions, le centre thermique peut-il donner des indications sur la zonation de température en fonction des types de plans d'eau et ainsi représenter des secteurs de l'étang où il y a une accumulation fréquente de chaleur ?

La typologie des plans d'eau analysée reste la même que pour l'hétérogénéité de la température. L'hétérogénéité des masses d'eau peut être quantifiée à partir de ce nouvel outil, sur les trois étangs étudiés.

Evolution du centre thermique d'un très petit étang profond

Le petit étang de Rilhac, de moins de 0,5 ha, a la particularité d'être abrité par une butte végétalisée sur sa partie ouest-sud-ouest, créant une zone ombragée sur une partie de l'étang. Le centre thermique a été calculé dans sa composante latitudinale et longitudinale dans un premier temps, l'un en fonction de l'autre (Figure 93,D) puis chacune des trois composantes en fonction du temps (Figure 93, A, B et C) de septembre 2017 à octobre 2018

afin de mesurer son évolution et d'analyser si celle-ci est influencée par la présence de la zone ombragée.

Evolution horizontale du centre thermique

Sur la période hivernale, la variation du CT est quasi nulle, à l'exception de quelques événements ponctuels difficilement descriptibles. A partir du mois d'avril, une tendance du CT se dessine avec un éloignement par rapport au centre de gravité pour se déplacer vers le nord-ouest de l'étang. Le CT se déplace vers la bouée 2, soit vers la partie ensoleillée de l'étang. La grande majorité du temps, le CT moyen est largement plus au nord par rapport au centre de volume du plan d'eau (Figure 93, D). Pendant toute la durée de la stratification estivale, le CT a été situé au nord-ouest du centre du volume, montrant un déplacement de chaleur vers la partie nord de l'étang. La stratification de la colonne d'eau provoque une diminution du bilan thermique de la zone la plus profonde, les eaux de fonds restant à des températures faibles et constantes. Sur l'étang de Rilhac, les eaux de fond, à 3m de profondeur, ne dépassent pas les 17°C, contre un maximum de 32°C à la surface. La forte stabilité du plan d'eau, liée à sa profondeur relative très importante, entraîne un éloignement du CT vers les zones les moins profondes, à l'ouest.

La distance moyenne entre les points du centre thermique horaire de l'étang et son centre de volume est de 1,34 m. Cette valeur évolue dans le temps, pour atteindre un maximum durant l'été de 1,81 m de distance entre le centre thermique et le centre de volume de l'étang. Afin de permettre la comparaison entre les étangs, la distance moyenne a été divisée par l'écart moyen entre les points de mesure et le centre de volume qui lui est fixe. La valeur a été multipliée par 100 afin d'obtenir un pourcentage. Pour l'étang de Rilhac, la valeur de l'indice est de 7,66, soit la valeur la plus haute pour les trois étangs étudiés.

Les valeurs de longitudes étant similaires pour les bouées B3 et B1, et les latitudes similaires pour B1 et B2, il est facile de comprendre le rôle de chaque secteur de l'étang étudié dans la dispersion de chaleur. Les variations de latitudes positives sont liées à une accumulation de chaleur sur la partie ensoleillée de l'étang, à l'inverse des autres secteurs. Des valeurs de longitudes faibles montrent une accumulation de chaleur liée à la bouée B3 ou, au contraire, à la plus faible chaleur de B1 en profondeur. Cette deuxième option semble la plus probable, liée à la stratification directe thermique importante de l'étang.

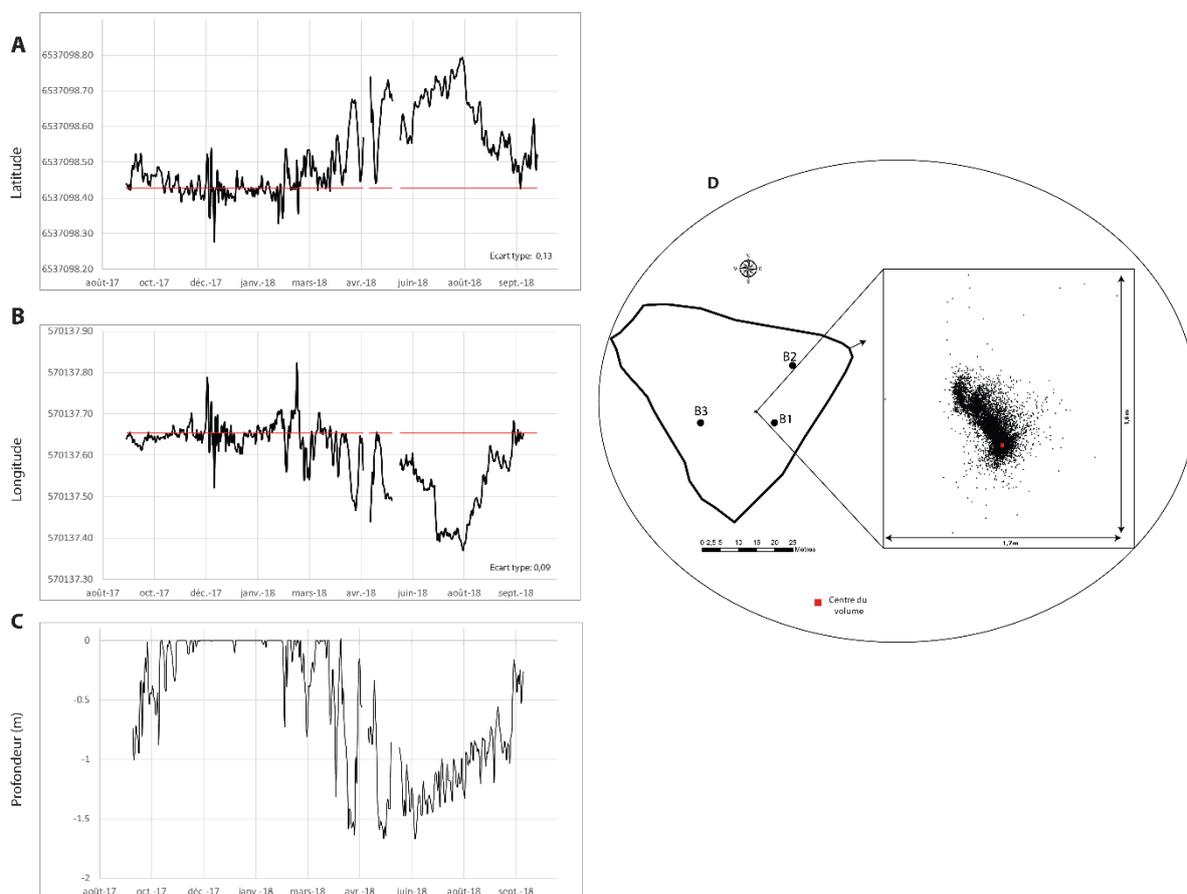


Figure 93: Evolution du centre thermique de l'étang de Rilhac dans ses composantes longitudinales (A) latitudinales (B) et verticale (C) avec sa représentation cartographique en deux dimensions (D). Choffel et al., 2018

Évolution verticale du centre thermique

L'évolution verticale du centre thermique suit celle de la thermocline. Le centre thermique prend en compte la moyenne des profondeurs de thermocline en chaque point de mesure du plan d'eau. Sur l'étang de Rilhac, à partir du mois d'avril, s'établit une thermocline de plus en plus stable. En fonction des forçages externes, l'accumulation de chaleur se déplace à plus grande proximité de la surface. Cependant, de fin avril à septembre, la profondeur du centre thermique n'a pas atteint la surface, synonyme d'une homothermie verticale de la masse d'eau. Sur l'étang de Rilhac, au maximum de stabilité le centre thermique est localisé à environ 1,7 m de profondeur. Durant l'été, sa profondeur varie de 0,8 à 1,7 m. Durant le printemps, la profondeur du CT n'atteint pas plus de 1,4 m (Figure 93, C).

L'étang de Rilhac a une répartition calorifique influencée à la fois par sa forte stabilité dans la partie profonde, en B1, et à la fois par les écarts thermiques entre une zone ensoleillée plus chaude (B2) et une partie ombragée (B3). Malgré sa très petite taille, l'étang connaît des variations thermiques fortes. De mai à septembre, l'écart thermique entre les bassins ensoleillé et ombragé est fort, avant de retrouver une position du CT proche du centre de gravité à l'automne et à l'hiver. L'accumulation de chaleur moyenne se rapproche de la sortie d'eau de l'étang amenant à une eau généralement plus chaude vers le cours d'eau que si la sortie était située à l'opposé, soit au secteur à l'ombre. Pour des étangs de cette taille, l'effet de l'ombrage semble conséquent et son utilisation appliquée pourrait permettre de réduire l'aléa thermique dans le cours d'eau récepteur.

L'effet du vent sur l'évolution du centre thermique d'un grand étang (étang de la Ramade)

L'analyse du centre thermique de la Ramade a été effectuée sur une période de mars à septembre 2016⁵⁰. L'étang est représentatif des grands étangs multilobés, où la variation du centre thermique devrait atteindre un maximum.

Analyse zonale du centre thermique

Les variations longitudinale et latitudinale ont été étudiées de mars à septembre 2016 (Figure 94, A et B) au sein de l'étang (Figure 94,C). L'évolution du CT du grand étang multilobé suit globalement les phases de stratification et de brassage, impactant majoritairement la zone la plus profonde, au niveau de la chaussée (B1). Le CT varie beaucoup, démontrant des répartitions inégales de chaleur au sein du plan d'eau de manière récurrente mais sans dessiner de grandes tendances. Les variations s'effectuent majoritairement sur la composante longitudinale, soit entre la partie la plus au nord, le bassin peu profond représenté par B4, et celle au sud, au niveau de la chaussée (B1). La zone centrale profonde joue également un rôle de tampon et vient limiter les écarts entre les deux extrémités.

Lors de périodes de stratifications thermiques, l'effet est le même que pour l'étang de Rilhac, bien que dans une moindre mesure, mais le CT se déplace vers le nord de l'étang et l'ouest, soit les zones les moins profondes. C'est lors des brassages que les parties profondes de l'étang récupèrent plus de calories par diffusion de la chaleur de surface vers les couches

⁵⁰ Il a été préféré de ne garder que cette période de fonctionnement optimal de l'ensemble des thermomètres dans l'étang. Sur les 3 années, les problèmes techniques n'ont pas permis d'avoir une période aussi longue de mesure complète dans les 4 bouées de l'étang.

profondes. Le CT se déplace alors régulièrement, durant l'été, vers le nord pendant une période d'une dizaine de jour, avant de glisser au sud lors du brassage de la masse d'eau.

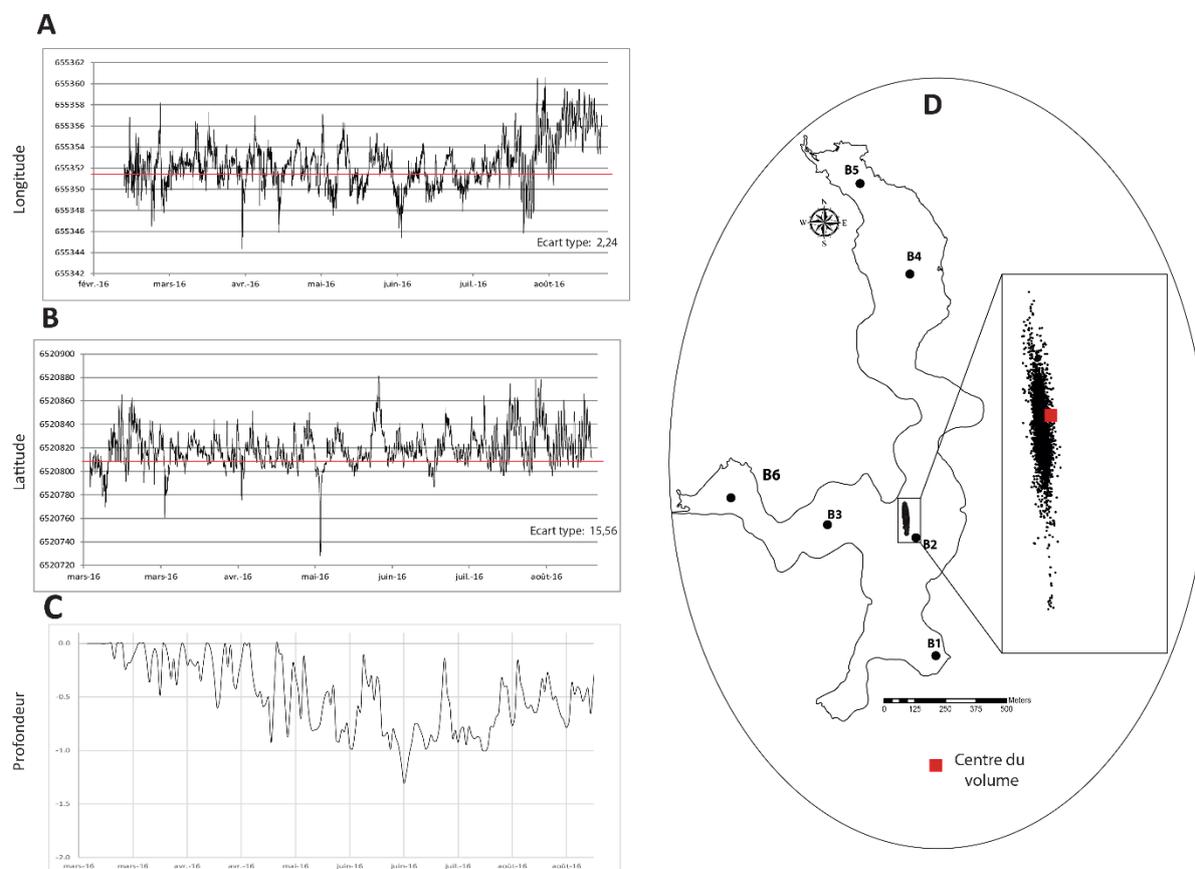


Figure 94: Evolution du centre thermique de l'étang de la Ramade dans ses composantes longitudinale (A) latitudinale (B) et verticale (C) avec sa représentation cartographique en 2D (D)

Le CT a eu des positions extrêmes, soit très au sud, soit très au nord à quelques reprises, le plus souvent de manière ponctuelle, lorsque que soit le bassin nord, soit le bassin au niveau de la chaussée ont connu des écarts de températures forts et de manière autonome. Ce fut le cas lors de l'épisode venteux du 1^{er} juin, qui a déclenché un refroidissement complet important du bassin nord et poussé les eaux chaudes vers le sud (cf. III.6.2.1.2). A l'inverse, à la fin du même mois, la partie nord bénéficie de l'apport de chaleur au détriment du sud de l'étang, provoquant un déplacement du CT vers les plus hautes latitudes (Figure 95).

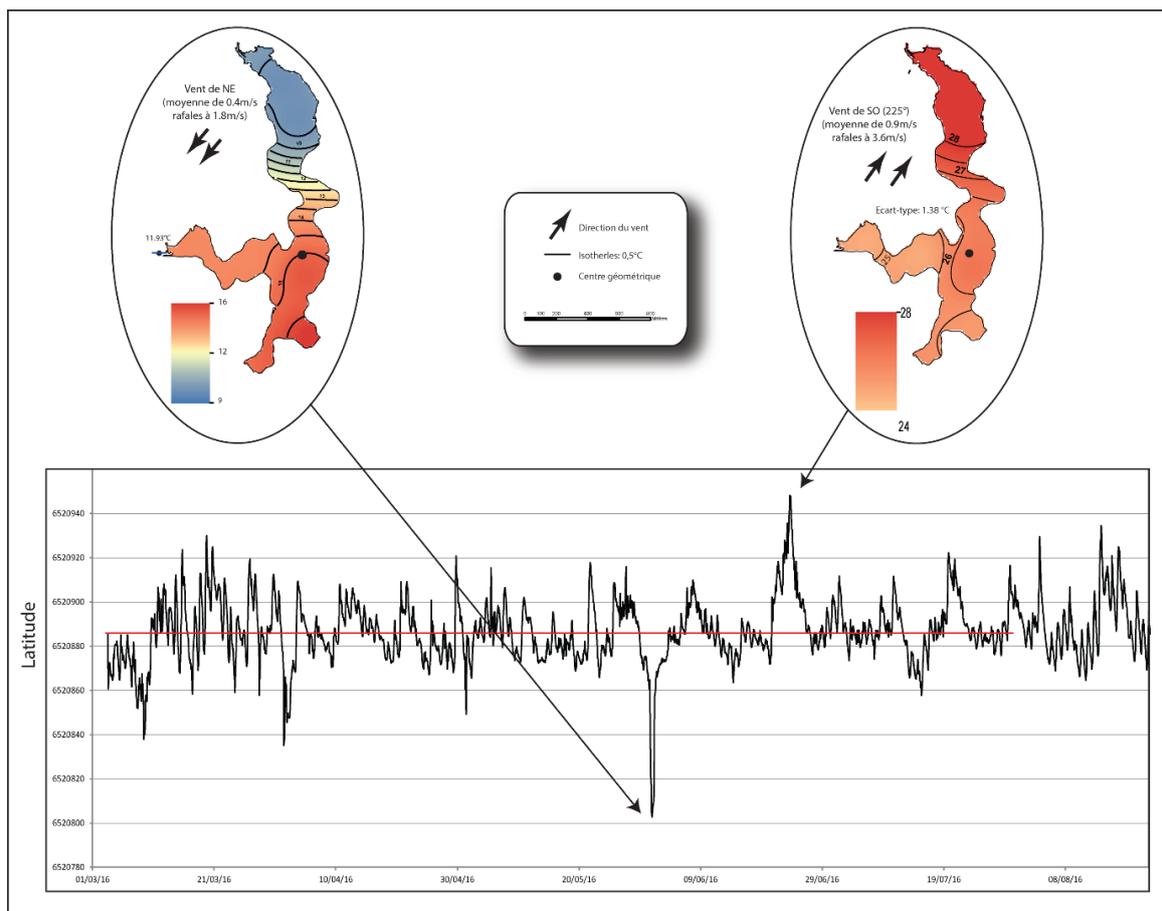


Figure 95: Analyse cartographique de la répartition de chaleur lors de deux positions extrêmes du centre thermique de l'étang de la Ramade. Q. Choffel, 2017

Du fait de la grande superficie de l'étang et de la distance importante entre les chaînes de thermomètres, la distance moyenne entre les points du centre thermique horaire et le centre de volume du lac est de 19,6 m, avec un maximum à 81,2 m. Comme pour l'étang de Rilhac, l'éloignement moyen a été divisée par la distance moyenne entre les chaînes de mesure et le centre volumique, et multipliée par 100 afin d'obtenir la valeur de l'indice de 4,43. Cette distance moyenne pondérée est inférieure à celle de l'étang de Rilhac, malgré la forme et la grande superficie de l'étang de la Ramade.

Analyse de la position verticale du centre thermique

Sur l'étang de la Ramade l'évolution de la profondeur du centre thermique est causée par l'établissement de stratifications en un secteur de l'étang. La présence de deux bassins peu profonds et d'un secteur profond au centre et à la chaussée, provoque des variations importantes du CT. Au printemps, les premières stratifications, notamment des bassins peu

profonds, entraînent l'apparition d'une thermocline sur les 50 premiers centimètres. Au début de l'été le centre thermique s'enfonce plus en profondeur mais est perturbé par quelques homothermies estivales. La thermocline moyenne sur les quatre points de mesure a atteint un maximum de 1,30 m de profondeur le 15 juin tandis que l'ensemble de l'étang était stratifié. En juin et juillet, le CT est bas, entre 0,8 et 1,3 m de profondeur, tandis qu'il remonte légèrement en août, oscillant entre 0,3 et 0,8 m (Figure 94, C). Cette remontée au mois d'août est due à un fonctionnement autonome du bassin nord, peu profond, régulièrement en homothermie chaude par son influence aux vents. Ce bassin fait remonter le CT vers la surface, mais concentre beaucoup de chaleur sur toute sa colonne d'eau (Figure 94).

Sur le grand étang de la Ramade les variations du centre thermique sont fortes, avec des déplacements nord-sud importants et des écarts avec le centre de gravité du plan d'eau de plusieurs dizaines de mètres. Le fonctionnement thermique interne à la masse d'eau et l'action mécanique sont les principaux acteurs de ces déplacements de CT. Les phases de brassage et d'homothermie régulent les mouvements du centre thermique vers les zones profondes ou vers les bassins peu profonds. En certaines périodes, l'éloignement maximal du centre thermique expose un fonctionnement autonome des baies, se dissociant de celui du cœur de la masse d'eau, soit le bassin profond. Les variations spatiales sont cependant inférieures à celles du petit étang de Rilhac, lorsque l'on utilise la distance moyenne pondérée.

Evolution d'un étang avec un temps de rétention court

Des trois étangs étudiés, celui de Baerenthal est celui dont la température a une évolution spatiale la plus homogène sur l'ensemble du plan d'eau. L'évolution du centre thermique est régulière, oscillant légèrement mais sans tendances générales qui se dessinent. Durant l'automne, la variation du CT est quasi nulle, l'étang est en parfaite homothermie verticale et horizontale. Durant l'été, les variations sont légèrement plus grandes, mais restent proche du centre du volume. D'un point de vue temporel, le centre thermique de l'étang est situé plus vers l'est et la chaussée de juin à septembre. Les oscillations sont faibles mais on décèle une tendance à l'accumulation de chaleur le plus à l'est, soit au plus loin du cours d'eau entrant.

L'hiver est, pour cet étang, synonyme des plus fortes variations spatiales de la température. C'est en effet, lors de la période hivernale et des jours les plus froids que l'étang connaît des variations importantes du CT. Lors des périodes les plus froides dans la vallée de la Zinsel du Nord, l'étang de Baerenthal connaît régulièrement une prise en glace. Lors de la prise en glace, une stratification thermique inverse s'installe. La prise en glace de l'étang ne concerne pas toujours l'ensemble du plan d'eau. Lorsque celle-ci est partielle, les écarts de bilan thermique peuvent être conséquents, comme pour la fin du mois de février et le début du mois de mars 2018, où la partie ouest de l'étang, proche de la queue, était libre, à l'inverse du reste de l'étang pris en glace (Photo 12).



Photo 12: Image aérienne de l'étang de Baerenthal durant l'hiver 2017. Bing aerial

Le 26 février, au moment où le centre thermique est situé le plus à l'est, la partie ouest de l'étang (B3) est en homothermie proche de 0°C, avec des valeurs minimales de 0,3°C de 8h à 10h. Le cours d'eau entre dans l'étang à une température d'environ 1,4 °C. A l'est, au niveau du centre (B2) et de la chaussée (B1), l'étang est en stratification inverse avec prise en glace, à l'image de la photo aérienne. Le fond de l'étang est à une température proche de 2°C à partir de 1,5 m. La profondeur permet de garder de l'énergie au fond, partiellement isolée du refroidissement des couches de surface par la présence de la thermocline. Cette énergie contenue dans les couches de fond permet aux parties est de l'étang d'avoir un bilan thermique encore élevé, à l'inverse de la partie ouest.

Durant l'été, de légères variations ont lieu, les variations longitudinales oscillant vers l'ouest au début de l'été et l'est vers la fin de l'été et l'automne. Ces écarts expriment une

répartition de chaleur vers l'amont de l'étang au début de l'été et vers la chaussée globalement à la fin de l'été et au début de l'automne (Figure 96).

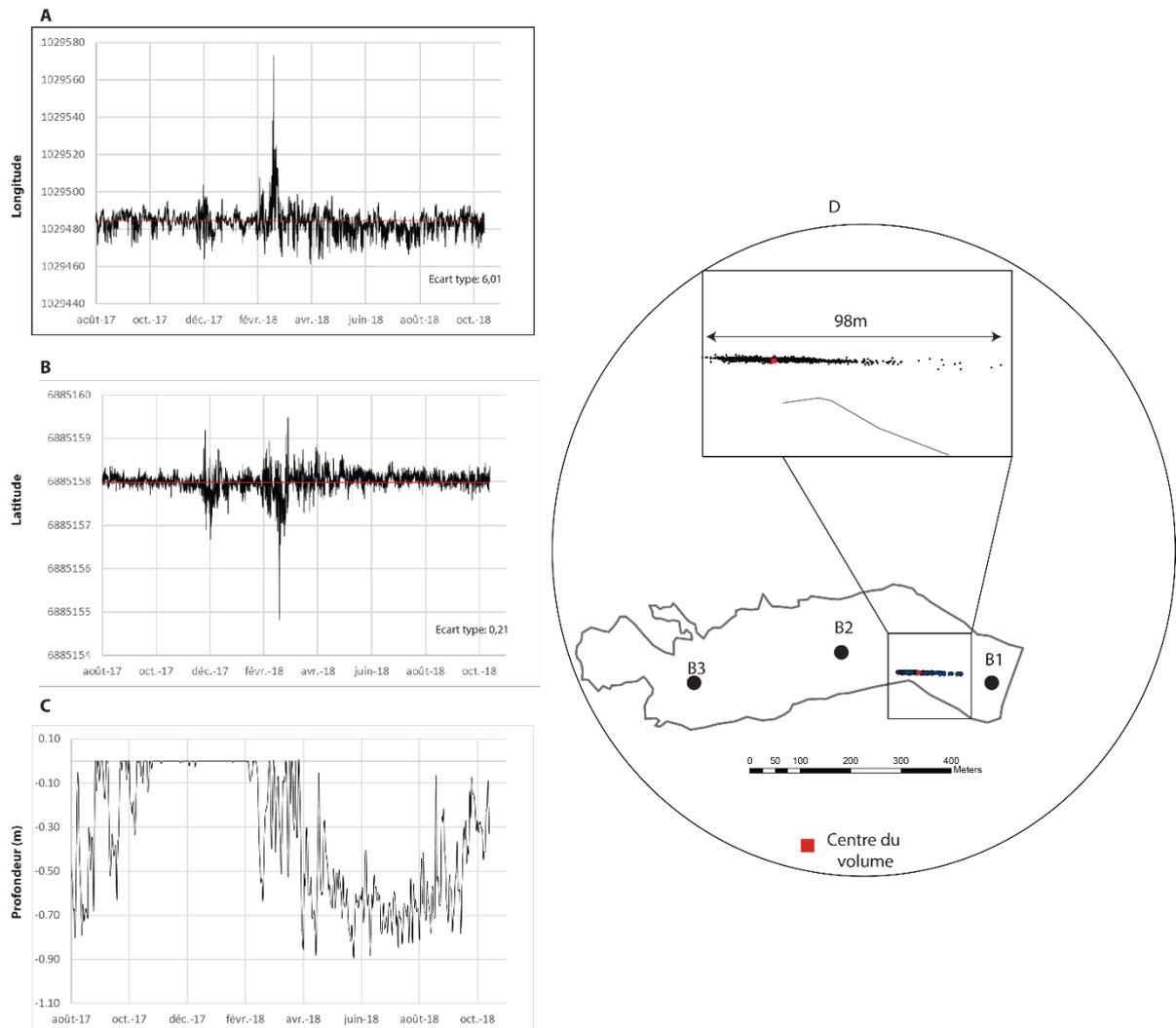


Figure 96: Evolution du centre thermique de l'étang de Baerenthal dans ses composantes longitudinale (A) latitudinale (B) et verticale (C) avec sa représentation cartographique en 2D (D)

La distance moyenne entre les centres thermiques horaires et le centre volumique de l'étang est de 4m, ramenée à 2m par pondération des distances moyennes entre les points de mesure et le centre volumique. Cette valeur est la plus faible des trois étangs. A l'inverse, cependant, dans un cas ponctuel, elle atteint un maximum particulièrement élevé avec un éloignement de 85 m du centre volumique, lors de l'épisode hivernal particulier de séparation de l'étang en deux masses d'eau (Photo 12). Ce maximum est élevé comparé aux autres étangs et contraste avec la faible variation spatiale le reste du temps pour l'étang de Baerenthal.

L'évolution spatiale du CT de l'étang de Baerenthal est réduite, malgré la première hypothèse d'influence d'un tributaire avec un débit conséquent. C'est lors de conditions hivernales que les périodes de variations spatiales de chaleur sont les plus fortes, avec la prise en glace partielle de l'étang. Durant l'été, cet étang de forme simple *et allongée* ne subit pas de fortes hétérogénéités spatiales et semble répondre comme un seul et même élément hydrologique.

Le centre thermique est un nouvel outil synthétisant l'ensemble des échanges thermiques au sein du plan d'eau, dans les dimensions verticales et horizontales. Son analyse permet de mettre en avant la variation spatiale de la température et de la structure thermique. Plus la variation de température est forte, plus le centre thermique se déplace dans l'espace. Pour les plans d'eau multilobés ou aux formes complexes, il peut exprimer une certaine autonomie de fonctionnement de bassins plus ou moins isolés du cœur volumétrique du plan d'eau. Dans ces conditions, la forte hétérogénéité de la température entraîne une variation spatiale des caractères physico-chimiques dans leur ensemble. La prise de mesure pour l'analyse du plan d'eau, en un seul point, peut être remise en question, le plan d'eau fonctionnant parfois davantage comme une multitude de plans d'eau que comme une seule masse d'eau.

Dans de petits étangs, la présence d'une zone ombragée sur une partie du plan d'eau provoque également un déplacement du centre thermique, dont ce dernier atteint un maximum pour ces étangs du fait de la fréquence élevée d'écart thermique. Dans ces conditions, la localisation d'une zone ombragée dans des endroits stratégiques pourrait permettre de déplacer le centre calorifique.

Enfin, l'évolution du centre thermique a montré que pour les étangs avec un temps de séjour court, le cours d'eau entrant peut avoir un impact sur la répartition de chaleur au sein du plan d'eau. En période estivale, le tributaire semble légèrement refroidir la partie amont de l'étang, sans toutefois affecter tout l'étang. Lors des prises en glaces hivernales, le brassage froid de la partie la plus en amont de l'étang par l'arrivée du cours d'eau brassant la masse d'eau, peut entraîner une dissociation des masses d'eau de l'étang, l'une en homothermie froide tandis que la partie la plus éloignée est en stratification inverse.

Pour une gestion concertée et cohérente du plan d'eau, notamment pour ceux en barrage où les calories stockées dans l'étang sont déversées dans le cours d'eau aval, le centre thermique peut apporter un regard nouveau. Lorsque le CT est localisé plus près de la sortie d'eau que ne l'est le centre volumique, la tendance de répartition de chaleur tend vers l'émissaire. La zone proche de la sortie d'eau reçoit plus de calories que le reste de l'étang, là où il est demandé de limiter au maximum la chaleur déversée dans le cours d'eau.

Des variations sur des distances de plus de 80 mètres étant possibles dans certains cas, on comprend que, tant pour l'affinage des calculs que pour les réflexions de gestion, cet outil mériterait d'être utilisé.

Chapitre 8 : Une approche géolimnologique de la gestion des étangs

Les étangs sont des milieux construits et gérés par l'Homme, qui abritent une grande diversité d'espèces et d'habitats (Oertli & Frossard, 2013). Une gestion raisonnée permet de préserver le milieu et sa biodiversité ainsi que de limiter le risque thermique pouvant être induit à l'aval, là où l'étang laisse sa place à un linéaire de cours d'eau. La gestion des étangs est généralement orientée vers la préservation d'une activité, qu'elle soit piscicole ou de loisir, d'une espèce dans le cadre de réserves, ou d'un intérêt économique. Les échanges calorifiques et gazeux entre le milieu amont et aval ainsi que ceux au sein-même des étangs sont rarement pris en compte dans les modes de gestion. Une prise en compte globale des conditions physico-chimiques du cours d'eau barré et de l'étang, couplée avec les conditions météorologiques peut permettre de préserver un milieu lentique riche tout en minimisant les effets induits par le changement de milieu aquatique, du lotique vers le lentique, et du lentique vers le lotique.

Dans cet objectif, nous souhaitons proposer quelques clés de gestion à partir des données de température et d'oxygène avec une approche axée sur la variation spatiale de la masse d'eau, soit le volume d'eau complet de l'étang.

8.1 La composante spatiale peut-elle apporter des éléments dans la gestion de l'étang pour sa préservation et la réduction de leur incidence sur le milieu aval récepteur ?

8.1.1 L'apport de l'analyse spatiale dans la typologie des étangs en vue de leur gestion

Il existe de nombreux guides de gestion des étangs aux échelles globales (Trotignon J., 2002, Trintignac *et al.*, 2005, Schlumberger & Girard, 2013) ou locales (SMARL, 2011, EPTB Vienne (non daté)). Le but n'est pas d'ajouter un nouveau guide de gestion mais de tenter de proposer des méthodes douces liées aux aspects thermiques développés grâce à l'apport de la spatialisation des données.

Alors que les écarts thermiques horizontaux au sein d'un même plan d'eau peuvent varier de plus de 10°C, des questions telles que le choix du type, de la profondeur et de la

localisation de la sortie d'eau ou encore de la présence de zones ombragées et de l'arrivée d'un tributaire pourraient-elles nous aider à réduire l'aléa thermique à l'aval ou même au sein du plan d'eau ?

8.1.1.1 L'effet d'ombrage : un bénéfice de réduction thermique pour les étangs de faible superficie

Les petits étangs bénéficient d'une faible course du vent peu propice aux variations spatiales de température et à la répartition de chaleur. Une zone ombragée peut avoir un effet de réduction thermique important pour ces plans d'eau. Le vent ne pouvant pas homogénéiser spatialement le plan d'eau, des zones plus fraîches, principalement en surface, sont présentes aux endroits ombragés. Ces zones ombragées peuvent représenter une part importante du plan d'eau, comme pour le petit étang de 0,4 ha de Rilhac, où le tiers de sa superficie est concerné (Figure 76). Dans ce petit étang, la zone ombragée n'a pas atteint la température maximale de 30 °C, seuil létal de certaines espèces de *Persidae* (Tissot et Souchon, 2011), tandis qu'elle a été mesurée aux deux autres points de l'étang, dans sa partie ensoleillée pendant plus de 4h. En prenant des exemples de tolérances thermiques d'autres espèces, le seuil létal à 25°C, notamment pour la truite Fario (*Salmo Trutta*), a été dépassé à la surface de l'étang pendant 26,9 % du temps dans la partie ensoleillée de l'étang, contre 23,3 % dans sa partie ombragée, soit 66h de moins de septembre 2017 à octobre 2018. La zone ombragée diminue assez fortement les maxima thermiques causés par l'effet de la radiation solaire sur le plan d'eau, similaire à l'effet de la ripisylve en cours d'eau. La présence d'ombrage ou de zones abritées peut diminuer le risque thermique pour les espèces piscicoles sensibles. Alors que les espèces sensibles aux fortes chaleurs se déplacent vers les zones profondes en été, telle que l'Omble-chevalier descendant à plus de 100 m dans le lac Léman (Secondat, 1952), on peut supposer que certaines espèces puissent favoriser un déplacement horizontal. Ce dernier permet à l'espèce de bénéficier d'un taux d'oxygène encore élevé, alors qu'il peut diminuer brutalement en fonction de la profondeur.

Une gestion raisonnée pour diminuer l'aléa thermique aval

La présence d'étangs sur cours d'eau peut engendrer un aléa thermique sur le milieu récepteur aval. Le réchauffement moyen estival d'un plan d'eau à déversoir est de 2 à 3°C (Touchart, 2007). Pour les étangs équipés par ce type de sortie d'eau, la présence d'une zone ombragée peut engendrer une diminution de l'aléa thermique à l'aval, spécifiquement pour les petits plans d'eau peu affectés par le brassage forcé. D'après les mesures sur l'étang de

331

Rilhac, la zone ombragée est en moyenne de 0,25°C inférieure à celle ensoleillée durant l'été, située à quelques mètres de distance. Cette moyenne semble faible car elle intègre les périodes d'homogénéité spatiale nocturnes. Au maximum, l'écart mesuré entre les deux secteurs de l'étang a été de 3,3°C. Dans la journée, entre 11h et 16h, l'écart moyen entre les deux secteurs est de 2,2°C pendant la période estivale, soit une réduction thermique équivalente à un réchauffement moyen par un étang à déversoir. L'intérêt de la zone ombragée est qu'elle réduit les maxima de réchauffement lors de l'influence de la radiation solaire, sans influencer les minima ni perturber le cycle thermique diurne du cours d'eau, contrairement au moine, système d'évacuation des eaux préconisé par l'administration. La présence d'une zone ombragée au niveau de la sortie d'eau des petits étangs à déversoirs peut permettre une réduction du risque thermique à l'aval du plan d'eau au même titre qu'une ripisylve de cours d'eau permet de réduire le réchauffement et son absence peut engendrer une augmentation thermique de 2 à 6°C en cours d'eau (Nagasaka & Nakamura, 1999, Rutherford *et al.*, 2004).

En cours d'eau, l'alternance de zones d'ombre et de zones éclairées favorise la production d'invertébrés et d'herbiers et offre des habitats diversifiés pour les espèces de poissons (Hall & Lantz, 1969⁵¹). Pour les étangs, cette alternance d'habitat et de conditions physico-chimique des masses d'eau pourrait permettre de diversifier la faune et la flore présente et ainsi augmenter la biodiversité du site déjà remarquable.

8.1.1.2 Le choix stratégique de localisation et type de sortie d'eau pour les grands étangs

Pour les grands étangs c'est principalement le vent qui est le facteur de répartition verticale et horizontale de la chaleur. L'influence de zones ombragées est perturbée par l'effet du vent. L'action de ce dernier se propage en profondeur jusqu'au métastagnion voire l'hypostagnion si sa force conduit au brassage complet de la masse d'eau. Les étangs ont la particularité d'être artificiels et l'on peut se demander si une réflexion au préalable sur la localisation de la sortie d'eau et son type d'aménagement ne serait pas favorable à la réduction du risque thermique à l'aval ?

⁵¹Cité par Frochot *et al.*, in Les forêt riveraines des cours d'eau, Piégay, Pautou et Ruffinoni, 2003.

La compréhension de la dynamique thermique interne au plan d'eau, replacée dans un contexte de réseau hydrographique, permet celle de l'ensemble du système du continuum hydrologique. Les phases de réchauffement du milieu lotique par le milieu lentique amont peuvent être anticipées en fonction des conditions météorologiques et du type de sortie d'eau. La connaissance au préalable du fonctionnement thermique de différents étangs, notamment en lien avec leur morphologie, est fondamentale pour la bonne gestion de ces milieux. Sur le grand étang de la Ramade, orienté nord-sud, un vent modéré de nord-nord-ouest va entraîner une accumulation de chaleur au sud et un renforcement de la stratification de la colonne d'eau (Figure 97). Le vent pousse les eaux chaudes du nord vers le sud, soit vers la chaussée de l'étang et sa sortie vers le cours d'eau aval. Si le vent est faible, inférieur à environ 1m/s en moyenne, seule la partie superficielle de l'étang est concernée en période de stratification thermique. Dans ce cas, lorsque l'étang est en sortie d'eau de fond ou mixte, comme pour l'étang de la Ramade, l'écart entre l'amont et l'aval est réduit à quelques degrés (2 à 3°C). Lorsque le vent de nord souffle plus fortement il modifie la structure thermique de l'étang en diffusant de la chaleur vers le fond. C'est dans ces conditions que l'étang va réchauffer le plus fortement le cours d'eau avec plus de 3 à 4°C d'écart (Figure 97, B).

Les phases de brassage mécaniques sont les périodes de plus fort réchauffement pour les étangs avec sortie d'eau de fond ou mixte. Sur l'étang de la Ramade, où la chaussée est située au sud d'un étang orienté nord-sud principalement, les vents du nord apportent des calories vers la chaussée et en profondeur. Ils sont propices au plus fort réchauffement du cours d'eau aval, notamment par la diffusion de chaleur vers le fond de l'étang. Lorsque la stabilité est la plus forte au niveau de la chaussée, soit où les eaux de fond sont thermiquement isolées de la surface, l'influence thermique de l'étang sur le cours d'eau aval est moindre. L'influence est ponctuellement élevée, pour des valeurs hautes, mais reste sur une courte durée à l'inverse des phases de brassages où le réchauffement est plus durable, diminuant les minima.

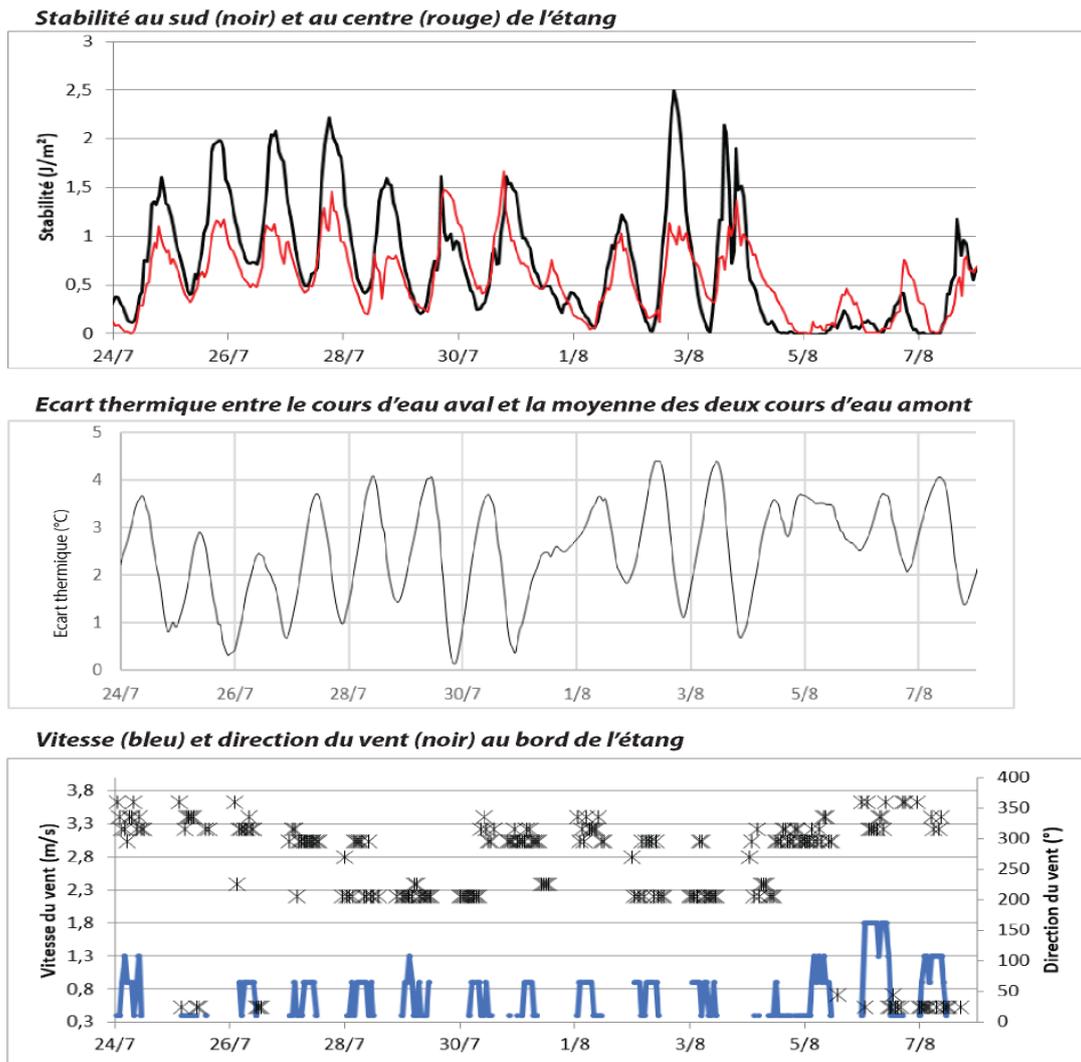


Figure 97: Variations de la structure thermique à la chaussée (rouge) et au centre de l'étang (noir) de la Ramade (A). Ecart thermique amont-aval (B) et vitesse et direction des vents (C) du 24 juillet au 7 août 2016

Le mode de gestion de l'étang est l'élément déterminant dans l'influence thermique du plan d'eau sur le milieu récepteur à l'aval (Touchart & Bartout, 2015). La présence d'un moine ou la prise d'eau de fond permet de diminuer les valeurs maximales de températures mais en pondérant l'amplitude thermique du cours d'eau. Si le moine est situé en face des vents dominants, son effet de tampon thermique risque d'être diminué. Le vent va permettre d'alimenter en chaleur les couches profondes et donc réduire l'écart thermique vertical propice à une diminution de l'aléa à l'aval par sortie d'eau de fond. Dans ce cas, la présence du moine n'aura aucun bénéfice par rapport à une sortie d'eau de surface de type déversoir. L'effet peut même être négatif puisqu'il va continuer à modifier le cycle thermique du plan d'eau et lui injecter plus de chaleur avec un risque d'anoxie ou de pollution par les sédiments.

L'installation d'un moine peut avoir un coût important pour un résultat peu significatif dans certains cas. La profondeur de la colonne d'eau à la chaussée a son importance dans l'efficacité du moine, tout comme sa gestion et la position géographique de la digue. Cette dernière, nullement prise en compte dans les études, peut réduire considérablement l'efficacité du moine si la chaussée se trouve face aux vents dominants, d'autant plus que le plan d'eau est grand et orienté dans cette même direction. Le coût du moine restera similaire, pour un effet bénéfique seulement ponctuel et limité.

8.1.2 L'utilisation du centre thermique dans une optique de réduction du risque aval

Quelle que soit sa taille, sa profondeur ou encore son altitude, un plan d'eau peut avoir de fortes variations de température dans sa composante horizontale (Touchart, 2001, 2007, Abbasi *et al.*, 2016, Soullignac, 2017). Bien souvent négligé, cet aspect peut nous apporter des solutions visant à limiter les fortes chaleurs pouvant augmenter considérablement le risque de mortalité d'espèces piscicoles sensibles aux fortes températures, ou encore limiter le risque thermique dans le cours d'eau aval. A l'inverse et pour la pisciculture notamment, il est souhaité que certains secteurs de l'étang ou même certains étangs bénéficient d'une eau chaude, favorable à la productivité du plan d'eau, favorables pour la croissance rapide de certaines espèces. Parce qu'il regroupe les aspects spatiaux verticaux et horizontaux ainsi que l'aspect temporel, le centre thermique peut être un indicateur efficace de bonne gestion thermique d'un plan d'eau et anticiper les effets néfastes possibles à l'aval.

8.1.2.1 Une anticipation de l'évolution du centre thermique selon les conditions météorologiques

Plus le centre thermique est éloigné du centre du volume du plan d'eau, plus le plan d'eau crée des ruptures spatiales. D'un point de vue géographique, le centre thermique donne une information sur les zones de répartition de chaleur les plus fréquentes. Par un effet d'ombrage ou d'orientation du vent par exemple, certaines zones du plan d'eau ont une tendance au réchauffement lors de la période estivale ou, à l'inverse, au refroidissement. L'apport de chaleur se faisant majoritairement par voie atmosphérique, la localisation du centre thermique dépend avant tout des conditions météorologiques. Une fois l'évolution du

centre thermique du plan d'eau connue, l'utilisation de données météorologiques peut permettre l'anticipation de risque thermique en certains secteurs.

Application sur l'étang de la Ramade

Sur l'étang de la Ramade, allongé dans le sens nord-sud, le vent du sud-ouest alors dominant durant l'été vient pousser les eaux chaudes vers le nord et ainsi déplacer le centre thermique loin de la chaussée. L'accumulation de chaleur se fait au niveau de la côte au vent bénéficiant des eaux de surface surchauffées de la partie centrale de l'étang. Dès lors que le vent souffle depuis cette direction, en période de stratification thermique, le centre thermique de l'étang se déplace vers le nord, diminuant le risque thermique pour le cours d'eau aval dont l'émissaire est situé à la rive opposée, au sud. A l'inverse, les vents de nord déplacent le centre thermique vers le sud. A contrario, les vents du nord se font plus rares sur le plateau de Millevaches, largement dominé par les vents de sud-ouest ouest. Lorsque le vent du nord survient, il pousse les calories vers la chaussée, bien que son apparition soit souvent synonyme de temps atmosphérique refroidie (Figure 98).

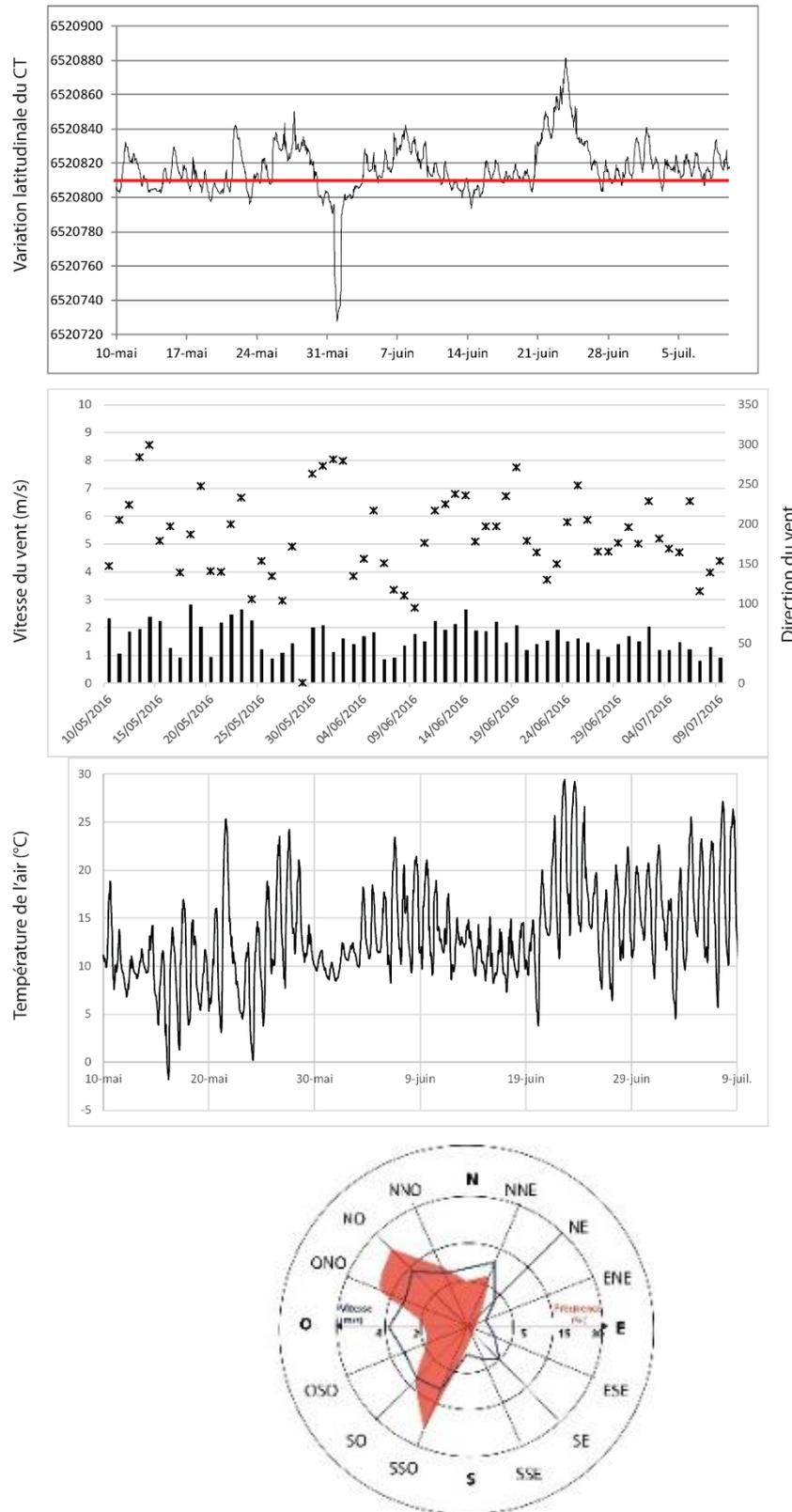


Figure 98: Etude de l'évolution latitudinale du centre thermique d'un étang (A) en fonction de la vitesse et direction du vent (B) ainsi que de la température de l'air (C). Rose des vents avec occurrence à proximité de l'étang (D)

Le centre thermique aura tendance à se déplacer vers la chaussée et donc vers le cours d'eau aval pour une occurrence d'environ 9 % du temps, pour l'étang de la Ramade. A l'inverse, la chaleur sera amenée vers le nord pendant 18 % du temps. Le reste de l'année, l'effet du vent est considéré comme faible pour le risque thermique aval puisqu'il n'affecte pas particulièrement la zone à proximité de la chaussée. Les vents d'ouest n'ont pas un fetch suffisant pour amener des calories vers la zone à risque. La localisation de la chaussée de l'étang peut être considérée comme à risque faible, puisque les vents dominants ont une tendance à éloigner les calories de la chaussée.

Appui du suivi piscicole

Sans toutefois évoquer les problématiques liées au risque thermique aval, l'analyse de la répartition de chaleur peut permettre d'apporter une connaissance supplémentaire pour la gestion du plan d'eau notamment pour la pêche. L'évolution du CT sous-entend également des mouvements de poissons au sein de l'étang ou des modifications localisées de leur comportement, dans l'hypothèse où la température peut influencer ces mouvements (Roy, 2014). En fonction de la période, certaines espèces piscicoles vont rechercher des secteurs réchauffés, ou, à l'inverse plus de fraîcheur en pic de chaleur estivale par exemple. Une démarche inverse consiste à anticiper le comportement des poissons si la chaleur est trop élevée en certains secteurs, ou trop fraîche, modifiant dans les deux cas leurs déplacements ou alimentation. L'effet du vent provoque des déplacements de chaleur mais aussi de plancton, servant de base à l'alimentation d'espèces piscicoles. La connaissance de l'évolution du centre thermique permet d'avoir un premier aperçu sur les zones de regroupement piscicoles possibles selon les périodes de l'année et les conditions météorologiques.

Une fois l'analyse du centre thermique effectuée sur une certaine durée, les conditions météorologiques peuvent suffire à prédire le déplacement de chaleur au sein du plan d'eau. Dans l'éventualité de la disposition de plusieurs modes de sortie d'eau au sein de l'étang, il est alors possible de moduler les profondeurs de sortie afin de limiter le risque thermique à l'aval.

8.1.2.2 Une efficacité de prévision du risque aval dépendante du type de sortie d'eau

Les analyses du centre thermique sur l'impact aval sont avant tout basées sur le type de sortie d'eau de l'étang. En sortie d'eau de fond ou de surface, les résultats du centre thermique ne donnent pas la même indication sur l'effet aval.

L'équipement de l'étang par un système de sortie d'eau permettant de choisir la profondeur rapidement et facilement, combiné à une analyse des conditions météorologiques et à une connaissance du fonctionnement thermique (aux échelles verticales et horizontales) du plan d'eau peut limiter considérablement l'influence thermique de l'étang vers le cours d'eau aval. La zonation de chaleur a une influence sur la température délivrée dans l'émissaire de l'étang.

Sortie de fond

Lorsque la chaleur est concentrée dans la partie opposée à la sortie d'eau de fond, le risque thermique est amoindri. C'est lorsque le centre thermique est situé proche de la chaussée que le barrage va avoir une influence majeure sur le cours d'eau. Sur l'étang de la Ramade, de fin avril à mi-août, les variations latitudinales du centre de gravité sont en lien avec les écarts de température entre le tributaire et l'émissaire (Figure 99). Le phénomène est, par exemple, très marqué, aux alentours du 20 juin 2016, où un vent de sud-sud-ouest soutenu (Figure 98) pousse les eaux chaudes vers le bassin situé le plus au nord. A ce moment, l'écart thermique est nul, voire même parfois négatif, c'est-à-dire que le plan d'eau refroidit le cours d'eau. A l'inverse, lorsque le centre thermique est proche de la chaussée, vers le sud, l'impact thermique de l'étang peut dépasser les 5 à 6 °C, comme la période aux alentours du 16 juillet 2016.

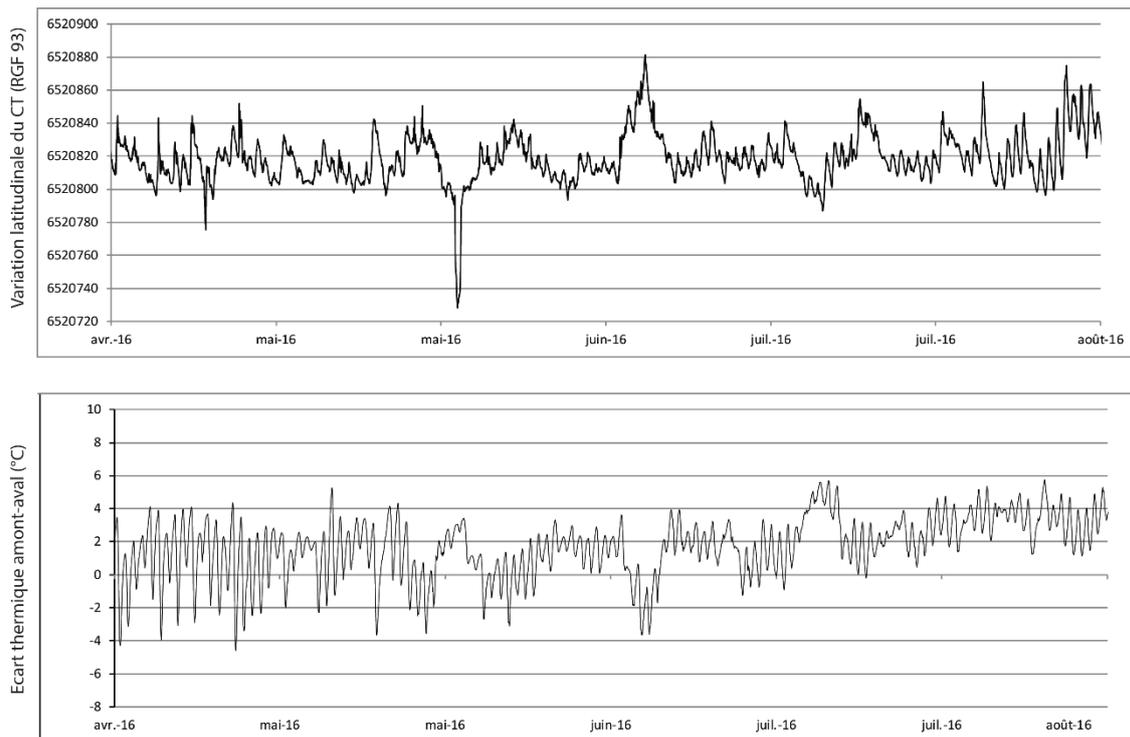


Figure 99: Evolution latitudinale du centre thermique (haut) et écarts de température amont-aval de l'étang (bas) sur l'étang de la Ramade. Q. Choffel, 2019

Etangs à sortie de surface

Sur un étang à sortie par déversoir de surface, comme celui de Baerenthal, l'analyse du centre thermique pour l'étude du risque aval est moins évidente. Les écarts spatiaux du centre thermique sont liés à des augmentations du bilan thermique en certain secteurs, souvent liés elles-mêmes à l'accumulation de chaleur dans les zones profondes. De fait, lorsqu'il s'agit d'une sortie de fond, le lien entre l'accumulation de chaleur en profondeur et l'impact sur le cours d'eau est direct. Le lien est moins évident lorsque la sortie d'eau se situe à la surface puisque le maximum de température de surface ne crée pas nécessairement de variation spatiale du centre thermique. Sur l'étang de Baerenthal, il n'y a pas de tendances marquées entre l'effet thermique de l'étang sur le cours d'eau aval et la variation spatiale du centre thermique. Ponctuellement, l'effet peut être opposé, avec un impact maximum lorsque le centre thermique est éloigné de la chaussée. Cet effet est dû à la forte stratification et l'accumulation de chaleur en surface, représentant un volume d'eau proportionnellement plus important dans les zones peu profondes. La queue de l'étang est la plus éloignée de la chaussée (vers l'ouest) et sa faible profondeur provoque un déplacement du CT vers elle lors des phases de forte stratification estivale.

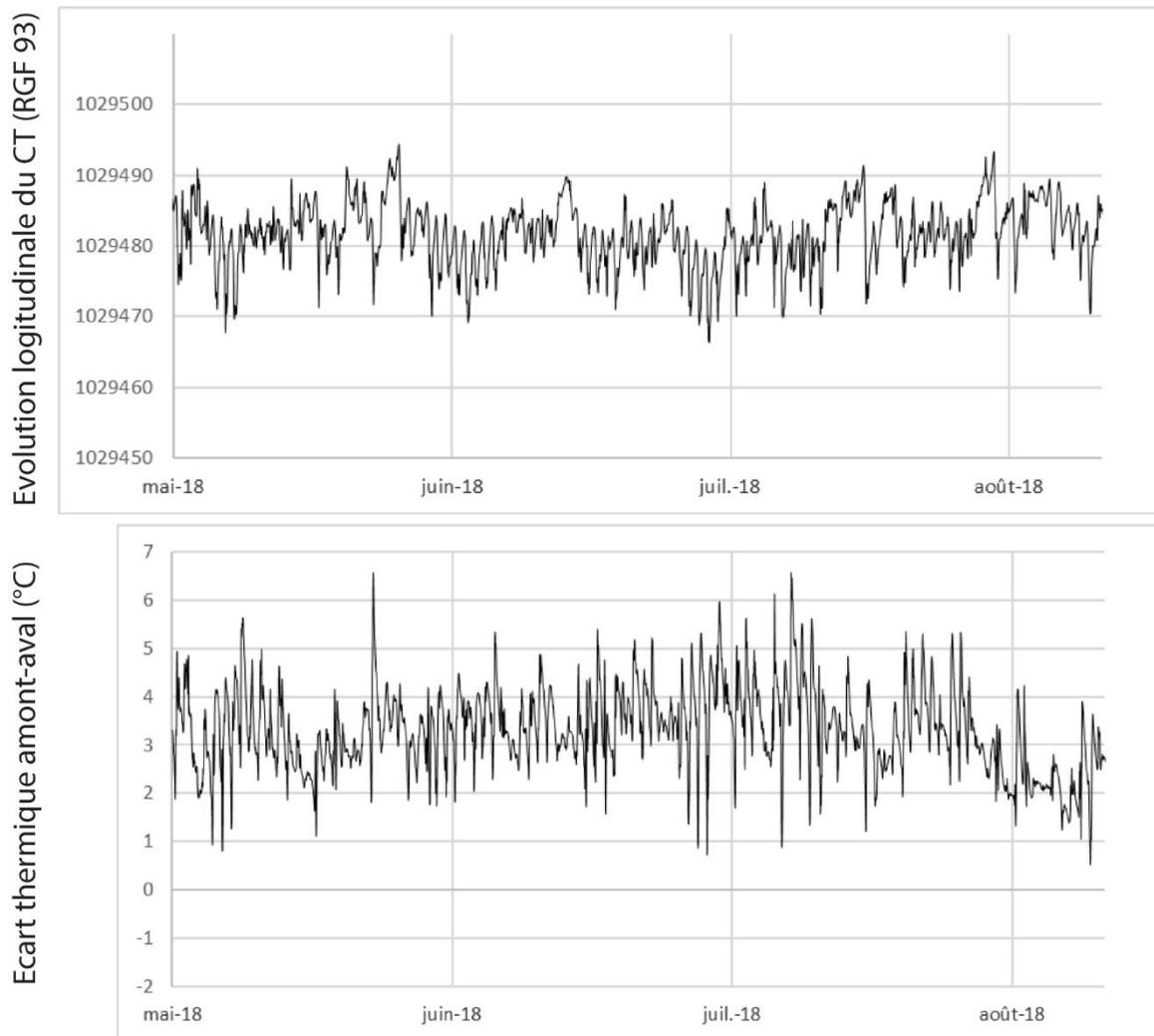


Figure 100: *Ecart de température amont-aval de l'étang de Baerenthal (bas) et évolution longitudinale du centre thermique (haut) de l'étang. Q. Choffel, 2019*

Sur un étang à déversoir de surface, le maximum de réchauffement de l'étang a lieu lorsque le CT est éloigné de la chaussée. L'accumulation de chaleur en surface augmente le bilan thermique des zones peu profondes éloignées de la chaussée. Cependant les tendances sont moins évidentes et l'analyse du CT semble moins appropriée pour l'étude du risque thermique aval des étangs à déversoirs de surface.

8.1.3 Quelle gestion adopter pour ces plans d'eau lorsque l'on peut choisir la profondeur de sortie d'eau ?

Sur les grands étangs la gestion peut être adoptée en fonction des vents, et notamment de leur direction et intensité, avec une adaptation de la profondeur de sortie d'eau.

Lorsque souffle un vent contraire à la chaussée de l'étang, soit un vent dont le fetch est proche de zéro au niveau de la sortie d'eau, le prélèvement d'une eau de surface permettrait d'avoir une eau peu réchauffée et bien oxygénée dans le cours d'eau aval (Figure 101, A). La thermocline aura une position plus haute, induisant une stabilité assez forte et de faible teneur en oxygène dans la partie profonde. Si un soutirage d'eau de fond est effectué, celui-ci peut souffrir d'un manque ou d'une absence complète d'oxygène.

A l'inverse, lorsque le vent souffle en direction de la chaussée, et donc que la course du vent sur l'étang est forte avant de l'atteindre, la thermocline va s'enfoncer dans le secteur au vent plus en profondeur, permettant la diffusion de chaleur et d'oxygène dans les couches plus profondes (Figure 101, B). Dans ces cas-là, un soutirage de mi-fond peut permettre de limiter le risque thermique avec une eau un peu plus fraîche qu'à la surface, tout en diminuant également le risque d'anoxie des eaux déversées dans le milieu lotique aval. Les couches profondes bénéficient d'un réchauffement mais restent inférieures à celles de surface, tout en bénéficiant d'une oxygénation correcte.

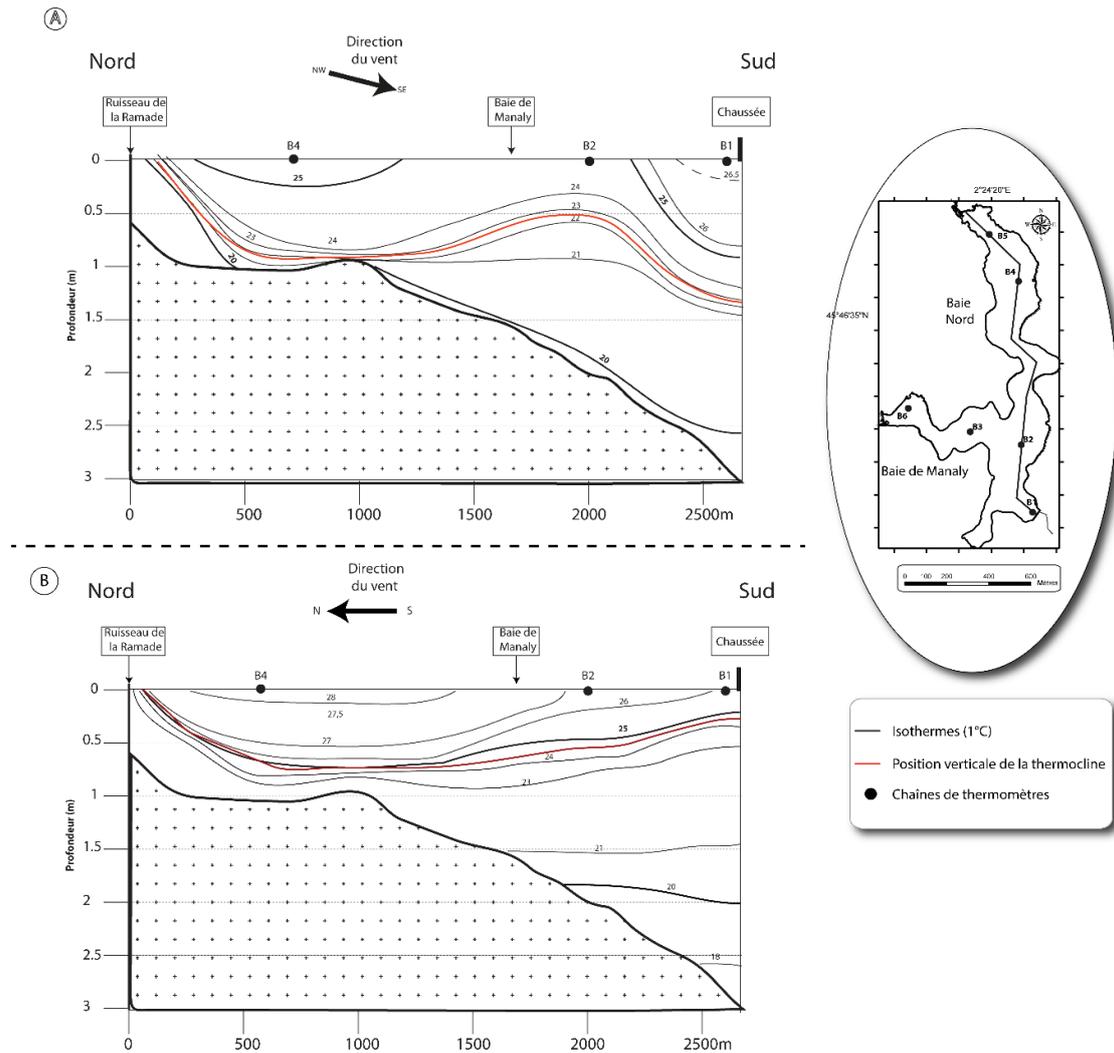


Figure 101: Coupe thermique nord-sud de l'étang de la Ramade par vent de nord-ouest (A) et sud-sud-ouest (B). Choffel et al., 2018, modifié

Enfin, lorsque l'étang est en stratification thermique directe sans effet notable du vent, le prélèvement d'une eau mixte, de surface et de mi-fond reste le meilleur moyen de limiter l'influence thermique aval tout en préservant une bonne oxygénation des eaux. Lors des phases d'homothermies, le choix de la profondeur de sortie d'eau est moindre puisque la température et les caractères physico-chimiques du plan d'eau sont similaires sur l'ensemble de la colonne d'eau.

Dans tous les cas, un système de plusieurs vannes ou un moine fonctionnant dans ses pleines possibilités, géré au jour le jour de façon souple, aiderait à tenir compte de ces préconisations.

8.1.4 Les étangs peuvent-ils abriter des espèces thermo-sensibles ?

Le milieu étang est le support d'une diversité piscicole différente de celle voulu dans les cours d'eau de tête de bassins. Par la nature poïkilotherme des poissons, la température de l'eau influence le comportement, les déplacements et la survie du poisson (Wetzel, 1983, Jalaber & Forstier, 2010). En étang, ce sont les espèces résistantes à de plus grandes températures qui sont privilégiées. L'effet de la température sur les organismes aquatiques a longtemps été étudié et reste une préoccupation écologique majeure (Tissot & Souchon, 2011). La forte productivité de l'étang, en partie liée à une température plus élevée, permet l'élevage d'espèces à haute capacité de résistance thermique ainsi qu'une croissance élevée du poisson. Les étangs sont donc les lieux privilégiés d'alevinage, de grossissement et de vie de ces espèces chaudes. Pour ces raisons, il existe une discordance entre les espèces souhaitées en cours d'eau et celles présentes en étang. La solution de suppression du milieu lentique comme barrage à l'écoulement et avec une présence d'espèces indésirées reste à l'heure actuelle l'option première. Des questions de gestion raisonnée et de non-perturbation du milieu persistent, dont la réelle volonté de limiter l'impact tout en préservant l'étang⁵². Dans l'éventualité de vouloir adapter les espèces des milieux lenticques à ceux lotiques, est-il thermiquement possible d'élever des salmonidés en étang ? Sans présumer analyser l'ensemble des facteurs abiotiques tels que la pente, le substrat, la vitesse d'écoulement, le pH, ni même les particularités entre la taille des espèces, leur taux de croissance ou encore la mortalité des juvéniles, il est choisi ici de voir si, d'un point de vue global, la température peut être un facteur limitant la survie des poissons de rivière. En d'autres termes, en prenant en compte la température en plusieurs points de l'étang et à différentes profondeurs, le milieu peut-il accueillir des espèces de salmonidés ? Si tel est le cas, des pistes de solutions économiques et environnementales peuvent être envisagées.

Les espèces piscicoles sont mobiles et ont une possibilité de se déplacer vers des zones refuges afin de résister à des épisodes thermiques critiques en cours d'eau (Secondat, 1952) et en plan d'eau (Tissot & Souchon, 2011). De ce postulat, il est donc fondamental de prendre en compte l'ensemble de l'étang et son volume, comme un tout et non pas en un seul point. Dans ce cadre, la température moyenne de chaque secteur, à chaque profondeur, a été

⁵²Discussions avec le gestionnaire de la Ramade (J.P Plane) et A. Cairault du Parc Naturel des Vosges du Nord et suite à l'intervention de nombreux gestionnaires en Sologne (1^{ère} journée des étangs, mai 2018) et en Brenne (Réserve Naturelle Nationale de Chérine, mai 2019).

utilisée afin d'obtenir la température moyenne de l'étang et ainsi couvrir les potentielles zones de refuges thermiques (Figure 102).

La truite fario (*Salmo trutta*) est régulièrement utilisée comme référence des espèces salmonidés en Europe de l'ouest. En utilisant cette référence, nous pouvons nous baser sur les valeurs de températures favorables à leur développement, appelées optimums thermiques, ainsi que celles critiques, à partir desquelles la truite fario peut ralentir ou inhiber son alimentation si ce seuil est dépassé pendant plusieurs jours (Hoar, 1942, Baldwin, 1957, Elliot, 1975⁵³). Au-delà du seuil critique, lorsque le seuil létal est dépassé, la mortalité de l'espèce peut être observée au bout de quelques heures. Ces seuils seront analysés, mais nous rappelons qu'ils ne prennent en aucun cas en compte l'acclimatation du poisson lorsque l'augmentation est progressive, pouvant retarder ces seuils.

Sur les trois étangs étudiés, la température moyenne a dépassé le seuil létal théorique de la truite de 9h (étang de Rilhac) à 32h (étang de la Ramade), avec 13h pour l'étang de Baerenthal (Figure 102). Pour l'étang profond de Rilhac, ces 9h représentent 0,32 % du temps. Elles ont eu lieu pendant 3h puis 6h consécutives, le 6 août pour les secondes, lors d'une forte stratification thermique de l'étang. Pour les deux autres étangs, moins profonds, c'est lors de brassages que la température moyenne a atteint son maximum, dépassant la valeur létale théorique pendant respectivement 0,2 et 0,7 % du temps pour Baerenthal et la Ramade. Le brassage mécanique de l'étang suite à une phase de forte stratification provoque la répartition des calories de surface vers les zones profondes et contribue ainsi à réchauffer l'ensemble du plan d'eau. Les 10 et 11 juillet 2016, la Ramade a dépassé le seuil létal des 25°C pendant 16h consécutives. Pour l'étang de Baerenthal, c'est après les fortes stratifications et températures du début du mois d'août, et lors du premier brassage, même partiel, que l'étang a dépassé le seuil létal pendant 5h consécutives.

Hormis durant les rares périodes de dépassement des 25°C pendant plusieurs heures, les températures moyennes des étangs étudiés sont principalement situées dans les zones critiques (24 à 43 % du temps), celui d'optimum thermique (22 à 27 % du temps) et enfin dans une zone neutre, sans effet positif ou négatif sur l'espèce choisie (45 à 49 % du temps)⁵⁴. La période critique se situe en été, de juin à août, où l'étang est situé dans la zone critique

⁵³Cités par A. Neuveu, in Baglinière *et al.*, 1998

⁵⁴Données calculées de février à octobre, et de mars à septembre pour l'étang de la Ramade

pendant une durée importante. Le reste de l'année, l'étang est en condition favorable, d'un point de vue thermique, à la présence d'espèces salmonidés.

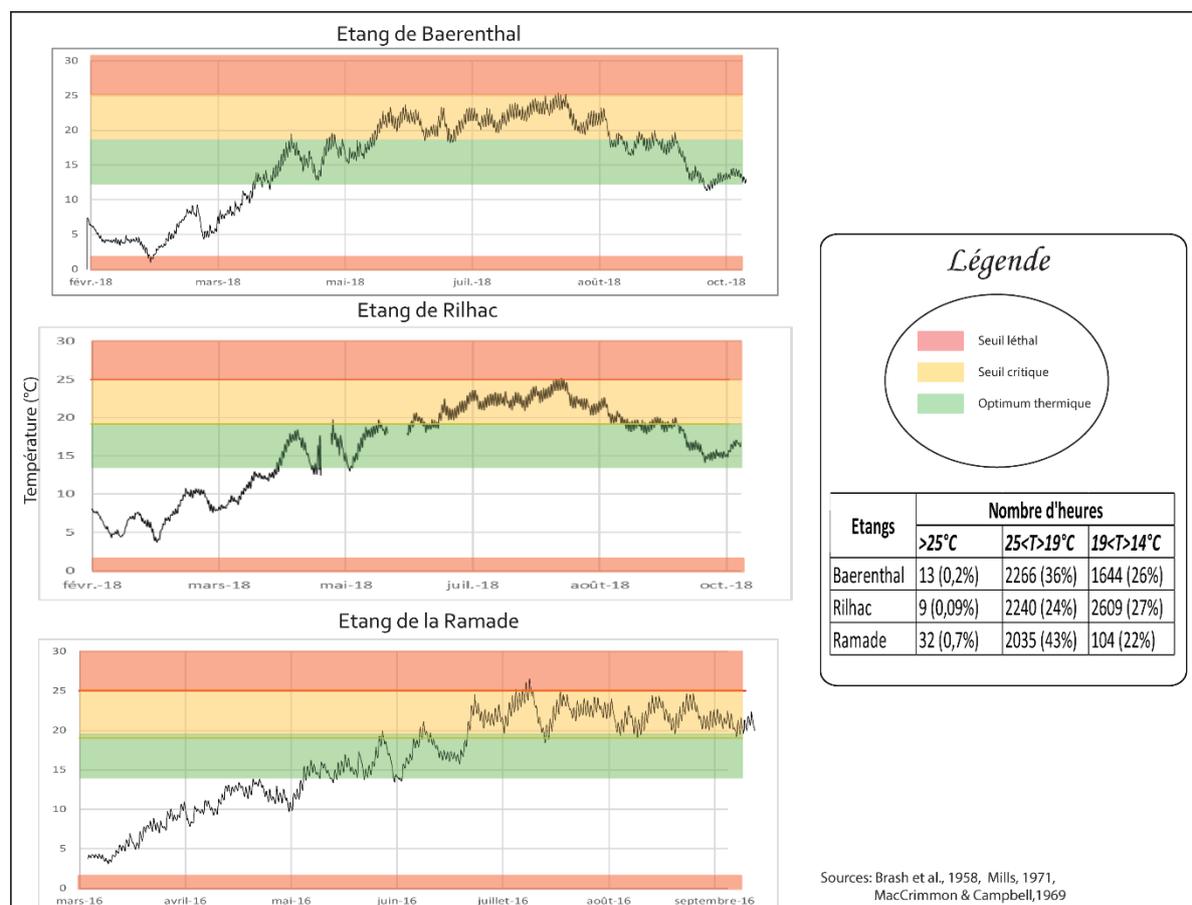


Figure 102: Températures moyennes horaires des étangs et seuils létaux de la truite commune (*Salmo trutta*). Sources : Brash et al., 1958, MacCrimmon & Campbell, 1969, Mills, 1971. Réalisation : Q. Choffel, 2019

Sur les trois étangs étudiés, l'étang le plus profond a des valeurs de seuil critique plus basses que les deux autres plans d'eau. La grande profondeur, de plus de 4m, permet de réduire la température moyenne du fait des eaux de fond plus froides. La profondeur peut donc entrer en considération dans le souhait de valoriser le type d'espèces salmonidés. Des étangs profonds répondent de manière plus efficace aux besoins d'une eau fraîche, alors que ceux peu profonds sont recherchés pour leur température élevée, et donc leur forte productivité, pour l'élevage d'espèce piscicoles préférant de fortes températures. La question de la profondeur peut entraîner rapidement le problème de qualité d'eau et notamment en termes d'oxygénation. L'établissement d'une stratification provoque une diminution des échanges entre la surface, et donc les gaz atmosphériques, et le fond de l'étang. La dégradation ou l'absence de ces échanges peut entraîner une eau peu oxygénée allant jusqu'à une possible anoxie complète. Or, de nombreuses espèces piscicoles ont un

besoin en oxygène conséquent quand d'autres peuvent survivre à un minimum d'oxygène dissous dans l'étang (Wetzel, 1983). En prenant en exemple la même espèce truite fario, sensible aux quantités d'oxygène dissous, nous avons analysé si elle subit un stress trop important ou des valeurs fatales en étang.

Sur l'étang de Baerenthal, profond d'un peu plus de 2m, les valeurs en oxygène moyennes sur une colonne d'eau sont globalement bonnes (45 %) entre juin et octobre, soit lors de la période la plus critique de l'année. Des valeurs en dessous de 2mg/l ont été mesurées ponctuellement, durant 47h, soit 1,5 % du temps. Ce seuil de 2mg/l est théoriquement une limite dans la survie de la truite fario (Doudoroff & Shumway, 1970⁵⁵). Pendant 53 % du temps estival et début d'automne, les valeurs sont situées dans un seuil intermédiaire pouvant avoir un impact localisé ou réduit sur l'espèce (Figure 103). Ces mesures ont cependant été effectuées en un seul point du lac, à la digue, soit à l'emplacement où les valeurs en oxygènes de fond sont au minimum. Des zones de refuges, en queue d'étang par exemple, là où le cours d'eau oxygéné se jette dans l'étang, peuvent être des espaces plus favorables à la survie du poisson en période de risque d'anoxie important.

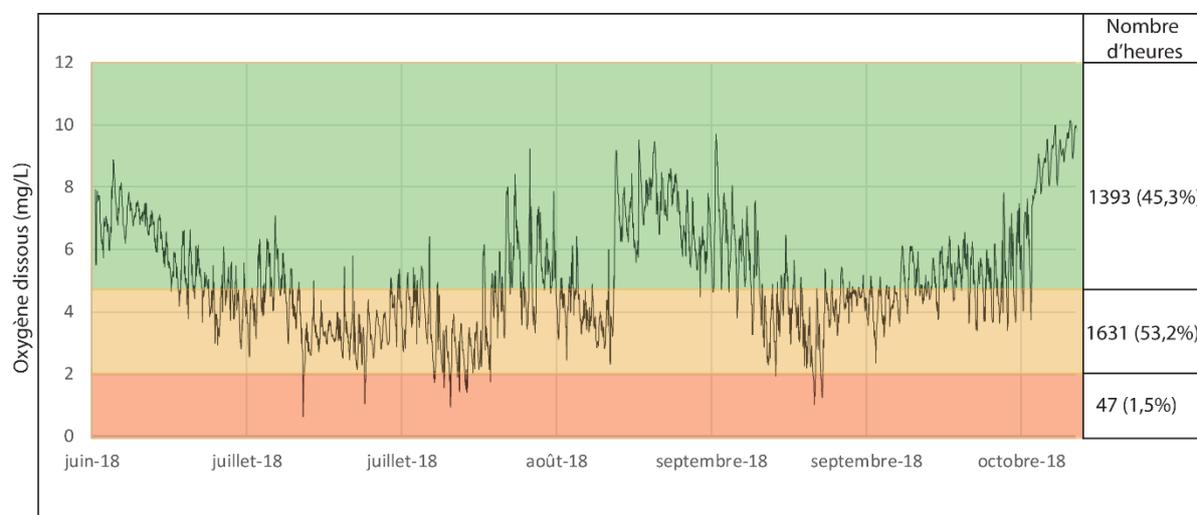


Figure 103: Quantité d'oxygène dissous moyenne dans la colonne d'eau de l'étang de Baerenthal au niveau de la chaussée. Réalisation: Q. Choffel, 2019

C'est principalement la combinaison d'une température élevée et de taux d'oxygène faibles qui induisent des mortalités élevées (Secondat, 1952, Tissot & Souchon, 2011, Roy, 2014). Or, sur l'étang de Baerenthal, aucune période de l'année n'est simultanément en très

⁵⁵Cités par R.F. Raleigh, 1982

faible quantité d'oxygène et de température faible. En revanche, lorsque les taux d'oxygène sont élevés, c'est principalement à la surface, là où la température est maximale. Ces conditions peuvent théoriquement avoir un impact négatif sur la vie piscicole d'espèces sensibles.

L'analyse de la température moyenne de l'étang, en plusieurs secteurs et à plusieurs profondeurs permet de répondre de manière spatialisée aux problèmes de risque thermique et à la mobilité des espèces piscicoles. Par leur capacité à trouver des zones refuges thermiques, les espèces peuvent privilégier certaines secteurs ou profondeurs de l'étang. En prenant les températures moyennes et donc une analyse volumique de la température de l'eau, il est très rare que l'ensemble de l'étang atteigne des valeurs très fortes. Par la variation de leur morphologie ou de leur habitat rivulaire, les étangs ont une capacité à créer une hétérogénéité thermique favorable aux espèces thermo-sensibles. La prise de mesure en un seul point peut fausser l'analyse de la température et de nombreux paramètres physico-chimiques.

Cette analyse rapide et partielle ne se veut en aucun cas un apport en écologie ou biologie, mais une réflexion basée sur les espèces piscicoles sensibles uniquement dans un but théorique de répondre à une hypothèse de mouvement du poisson et de répartition de température en analyse en trois dimensions. L'approfondissement sur la capacité d'adaptation de l'espèce ainsi que sa mobilité réelle (Secondat, 1952, Roy, 2014), couplée à celle de la température, permettrait de mieux comprendre l'effet des paramètres abiotiques sur la vie biologique des milieux aquatiques stagnustres.

8.2 La variable spatiale comme élément de dissociation des masses d'eau

8.2.1 Quel est l'apport de la spatialisation des données dans le monitoring environnemental ?

Les plans d'eau DCE sont suivis annuellement pour leurs paramètres biologiques et physico-chimiques. Dans les différents protocoles de mesures, la localisation préconisée est la zone la plus profonde, notamment pour les paramètres physico-chimiques et la transparence ⁵⁶ (Danis & Roubeix, 2014). Les recherches sur l'hétérogénéité spatiale des

⁵⁶Protocole de mesures de la transparence, 2016, Environnement.Gouv.qc.ca
Protocole de mesure DCE des lacs sentinelle.

variables biologiques et physico-chimiques mettent en avant une variation spatiale de ces variables au sein du plan d'eau (Soulignac, 2017, Wang *et al.*, 2013). La répartition du plancton, de la température et de la transparence de l'eau dépend des mouvements d'eau internes à la masse d'eau par la convection forcée. Une hypothèse réside dans le fait que plus le plan d'eau est grand, plus il est propice à la variabilité spatio-temporelle des variables biologiques et physico-chimiques (Soulignac *et al.*, 2016). La DCE, ne prend en compte que les plans d'eau de plus de 50 ha et laisse de côté 99 % des plans d'eau de France métropolitaine (Bartout, 2015, Soulignac, 2017) et ne prend pas en compte la possible variation spatiale des éléments physico-chimiques, biologiques et écologiques dans l'évaluation de l'état des plans d'eau. La prise en compte de la variation spatiale, même pour les plans d'eau de faible superficie, peut-elle amener à une meilleure évaluation de l'état écologique du plan d'eau ?

En étang, la variation importante de la bathymétrie, avec des zones pelliculaires et une partie profonde près de la chaussée amène au questionnement de la pertinence des mesures en un seul point. La morphologie des étangs en barrage est proche de celle des lacs de barrage avec une pente vers la chaussée. La zone profonde représente une partie réduite du plan d'eau, à l'inverse des lacs naturels dont la zone profonde est souvent centrale et occupe un pourcentage volumique conséquent. La prise de mesure dans la partie centrale des plans d'eau de barrage représente un volume d'eau réduit. Sur l'étang de la Ramade, la partie la plus profonde, supérieure à 2 m, représente 18 % du volume total des 750 000 m³ de l'étang. Le reste du plan d'eau peut être à des profondeurs inférieures à 1 m et avoir un fonctionnement différent. Sur ce même étang, la partie nord, inférieure à 1,5 m de profondeur maximale, représente le tiers du volume total pour la moitié de la superficie.

8.2.1.1 La variation de la transparence de l'eau

Le paramètre de la transparence de l'eau, par le biais du disque de Secchi, fait partie des mesures obligatoires de la directive. Les mesures sur une année en quatre points de l'étang de la Ramade montrent une variation spatio-temporelle de la transparence de l'eau. La zone la plus profonde bénéficie d'une transparence globalement située dans la partie « état moyen » des normes DCE. La zone au nord a une transparence plus réduite que le reste de l'étang. Les valeurs de disque de Secchi sont en moyenne comprises dans la zone d'« état mauvais » (Figure 104). La faible profondeur du bassin malgré sa grande superficie, son

absence d'abri au vent et l'arrivée d'un tributaire peuvent contribuer à la faible transparence du bassin.

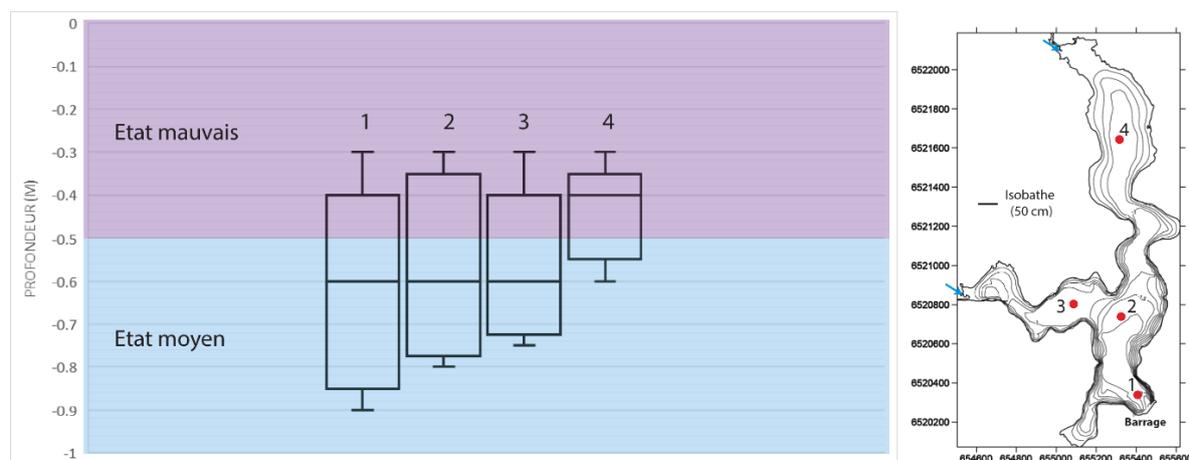


Figure 104: Profondeur disque de Secchi Ramade sur les années 2016 et 2017. *Q. Choffel, 2019, d'après la méthode de Soullignac et al., 2018*

Afin de pallier aux lacunes liées à la variation spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques des plans d'eau, la télédétection peut être un moyen efficace. Elle permet d'avoir un aperçu de possibles variations de température (Danis & Prats, 2015) ou de répartition de Chlorophylle A (Vinçon-Leite *et al.*, 2012) au sein du plan d'eau. L'inconvénient majeur réside dans la période de passage des satellites dont l'observateur est dépendant, ainsi que dans l'horaire de passage. Un passage lors de la matinée, comme pour le satellite Landsat 8 (à environ 10h) ne permet pas d'analyser la période la plus propice aux variations spatiales de température par exemple, plus décalée vers la fin de journée, soit au maximum de température de l'eau. De plus, l'analyse par télédétection est une analyse de surface et seule l'utilisation couplée avec un modèle permet de modéliser le fonctionnement de la thermique du plan d'eau et sa structure verticale. Ces modèles sont développés majoritairement pour les lacs profonds tandis qu'aucun n'existe réellement pour les plans d'eau de moins de 5 m de profondeur maximale. La faible connaissance de leur fonctionnement et la variabilité temporelle forte des étangs n'a pas réellement permis leur développement.

8.2.1.2 Variations de température

La température de l'eau est suivie régulièrement dans le cadre de l'application de la DCE 2000 qui préconise quatre mesures par an, au point le plus profond du plan d'eau (DCE 2000/60/CE, p.56). Il a été démontré dans les chapitres précédents que la variation thermique d'un étang pouvait être importante. Nous tentons ici d'analyser les écarts possibles de température mais aussi de stratification thermique, et donc des échanges thermiques, chimiques et gazeux entre la surface et le fond, afin de voir si la prise de mesure en un seul point est représentative de l'ensemble de l'étang.

Sur le plus grand des trois étangs étudiés et le seul considéré comme plan d'eau DCE, l'étang de la Ramade, la période du 6 au 13 juillet 2016 a été sélectionnée pour analyser, à une échelle précise, ces variations au sein d'un étang DCE de 3 m de profondeur maximale et de 62 ha durant la période estivale. Les variations verticales en plusieurs points de l'étang diffèrent notamment en fonction de la bathymétrie.

Les zones les moins profondes ont tendance à s'homogénéiser verticalement de manière plus régulière que les parties profondes. La thermocline majeure étant située à environ 1,5m de profondeur lors de cette période, les zones dont les profondeurs sont inférieures sont moins propices à être stratifiées. La partie au nord, la moins profonde connaît cependant des phases de stratification dans son mètre de colonne d'eau, notamment les 7 et 9 juillet pour cet exemple-ci. Le 7 juillet 2016, l'eau de surface de la partie nord et sud de l'étang dépasse les 30°C tandis que les secteurs ouest et au centre n'atteignent pas cette valeur et sont quelques degrés inférieurs. Le 6 juillet, l'ensemble du plan d'eau est stratifié sauf la partie au nord où la colonne d'eau reste homotherme et plus fraîche. La partie centrale accuse également un faible delta de température surface fond comparé aux secteurs ouest et sud (Figure 105).

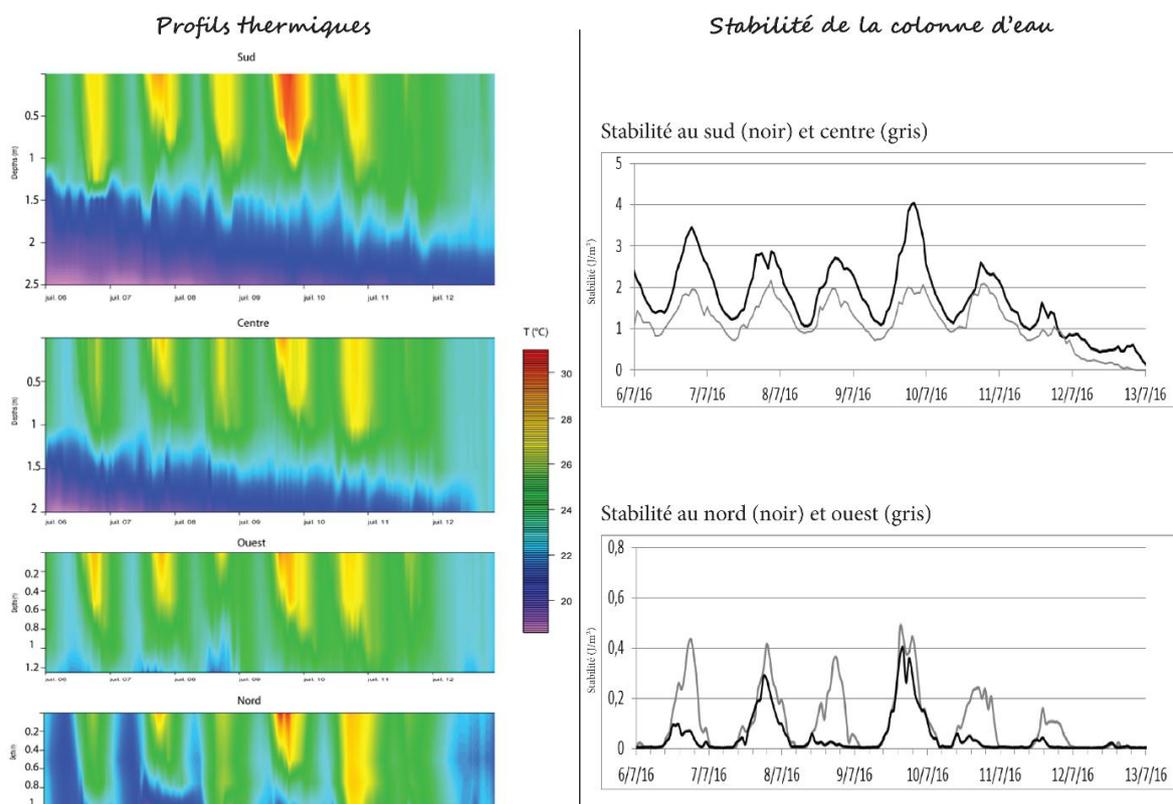


Figure 105: Variation spatiale, en 3D, de la température de l'étang de la Ramade (A). Comparaison des stabilités aux différents points de l'étang (B). Q. Choffel, 2019

Selon les conditions météorologiques, l'accumulation de chaleur se répartit de façon hétérogène au sein de l'étang. La température de surface est le marqueur le plus fort, mais la variation spatiale dans la structure thermique du plan d'eau est probablement la plus importante et la plus complexe à mesurer en l'absence de données *in situ*. La présence d'une stratification thermique modifie considérablement les paramètres physico-chimiques de la masse d'eau et notamment l'oxygène dissous essentiel à la vie aquatique. Elle régule la répartition verticale du plancton et les échanges gazeux avec l'atmosphère. La présence de zones lacustres ou stagnantes stratifiées et des secteurs brassés n'apportent pas les mêmes caractéristiques de la colonne d'eau lors de mesures en un seul point. L'absence de mesures spatiales peut générer des lacunes considérables dans l'évaluation et la compréhension du fonctionnement global du plan d'eau. Pour les étangs, malgré leur petite taille et leur faible profondeur, les variations spatio-temporelles de leurs caractéristiques physico-chimiques peuvent concerner une grande partie du plan d'eau. Pour les étangs multilobés ou ceux dont le trait de côte est complexe, il est préférable d'opérer les mesures en plusieurs points et de manière continue afin d'en assurer un suivi cohérent.

8.2.2 Le seuil surfacique de 50 ha recommandé par la DCE est-il l'élément déterminant dans la dissociation du fonctionnement interne des plans d'eau ?

Les plans d'eau font l'objet d'un suivi annuel de leurs paramètres physico-chimiques principaux lorsqu'ils font partie des plans d'eau DCE, soit de superficie supérieure à 50 ha. Ce seuil de 50 ha peut concerner des lacs au fonctionnement dimictique ou monomictique, mais aussi des étangs au fonctionnement polymictique du fait de leur faible profondeur. Des lacs de plusieurs centaines de mètres de profondeur, à l'image du Léman, sont suivis avec une méthodologie identique à celle des étangs de plus de 50 ha, mais de moins de 2 à 3 m de profondeur maximale, à l'image de celui de la Ramade. La méthodologie de mesure est remise en question dans l'aspect temporel, où il est recommandé de faire de 1 à 4 mesures annuelles (DCE 2000/60/CE, Annexe 5), pour les étangs dont la dynamique est pourtant variable à l'échelle de quelques jours. Ces mesures ponctuelles sont adaptées pour les lacs dont la profondeur est suffisamment importante pour bénéficier d'une dynamique saisonnière. Cette dynamique lente permet la prise de mesure seulement quelques fois dans l'année, généralement équivalent à une par saison. Il existe certes peu d'étangs ou de lacs pelliculaires supérieurs à 50 ha, mais pour ces cas précis, la méthodologie préconisée par la DCE se heurte à la réalité de terrain⁵⁷. Toutes les autres pièces d'eau inférieures à 50 ha, soit 99 % des pièces d'eau de France métropolitaine sont oubliées de ces problématiques liées à la DCE et sont intégrés à la « *masse d'eau cours d'eau* ». Pourquoi ce seuil des 50 ha a-t-il été sélectionné tandis qu'il n'est pas mentionné dans la bibliographie scientifique, lui préférant celui de 100 ha (Delebecque, 1896, Halbfass, 1923) ou encore celui des 1 ha (Rjanzin, 2005⁵⁸) ? L'aspect surfacique est-il un facteur suffisant de dissociation de masses d'eau ? Existe-t-il de fait des phénomènes lacustres manifestes uniquement au-delà de 50 ha ?

Nous allons tenter d'observer s'il existe des tendances visibles à partir du seuil de 50 ha sur les plans d'eau étudiés, ou si la superficie peut être remplacée ou suppléée par d'autres critères.

⁵⁷ A titre d'exemple, l'Agence de l'Eau Loire Bretagne, par l'intermédiaire de M. Coulon, ne mesure plus les paramètres physico-chimiques en étangs en Brenne car il estime que le protocole DCE est inadapté. Ces masses d'eau plan d'eau de Brenne sont des milieux invisibles, ni en bon état, ni en mauvais état.

⁵⁸Cité par Bartout, 2015 : « L'incompréhension de la place prise par les plans d'eau dans l'Union européenne et ses conséquences réglementaires », *Noroi*, 235 :17-36.

8.2.2.1 L'élément surfacique est-il déterminant dans la dissociation des masses d'eau?

Pour la Directive Cadre sur l'Eau, le seuil des 50 ha n'est pas figé et « *peut être étendu aux plans d'eau de plus petite taille compris entre 20 ha et 50 ha* » (DCE 2005-11, 2005, p.6). Cette extension des limites surfaciques montre la difficulté à trouver un seuil justifié scientifiquement et prouve également le besoin et l'intérêt de se tourner vers les petits plans d'eau de moins de 50 ha, dont la biodiversité est tout aussi essentielle (Boix *et al.*, 2012, Oertli & Frossard, 2013) tout comme leur place au sein des territoires de l'eau (Bartout & Touchart, 2017).

La variable de surface est l'élément le plus facilement mesurable, notamment depuis le développement des outils d'analyse spatiale et de télédétection. Dans la logique commune, plus un plan d'eau est grand, plus il a de chances d'être profond et donc de répondre à des caractéristiques lacustres. A l'image des lacs Balaton en Hongrie et Peipsi à la frontière entre l'Estonie et la Russie par exemple, certains grands lacs sont pelliculaires et leur dynamique thermique est très différente de celle des lacs profonds (Papon, 2007). Le critère de la taille joue un rôle dans la structure du plan d'eau, notamment lié à la course du vent, mais ce critère peut-il remplir les conditions suffisantes pour dissocier les lacs des étangs et des mares ?

Sur les étangs étudiés, si l'on compare celui de la Ramade à celui de Baerenthal, la variation spatiale de la température de l'eau est d'autant plus forte que l'étang est de superficie importante. Sur l'étang de la Ramade, de plus de 62 ha, la variation spatiale est conséquente et impulse une dynamique particulière au plan d'eau. A l'inverse, l'étang de 11 ha de Baerenthal est quant à lui plutôt homogène spatialement, avec de faibles variations horizontales de température. Pour ces étangs, le facteur spatial entraîne une distinction entre les masses d'eau. L'hypothèse que l'étang de la Ramade est composé de plusieurs bassins fonctionnant parfois en autonomie ne se retrouve pas dans celui de Baerenthal, plus petit. Cependant, ces paramètres sont aussi liés à la forme du plan d'eau, très découpé et ennoyant des alvéoles créant des bassins pour la Ramade, tandis que la cuvette stagnante de Baerenthal est plus homogène. L'aspect superficie ne semble pas suffire non plus si l'on prend en compte le très petit étang de Rilhac, de seulement 0,4 ha, mais dont les variations spatiales sont fortes au milieu de la journée, supérieures à celles de l'étang de Baerenthal. Du fait de la présence d'une partie ombragée et abritée, ce petit étang quasi circulaire

bénéficie des variations spatiales les plus constantes des trois étangs étudiés, avec une partie ensoleillée jouissant de la radiation solaire et capable de se réchauffer plus fortement durant la journée que la partie ombragée représentant le tiers de l'étang. Malgré ses 0,4 ha, soit une superficie de près de 30 fois inférieure à celle de Baerenthal, l'étang de Rilhac connaît une dissociation des masses d'eau interne à l'étang. En revanche, bien que plus fréquents pour le petit étang, les écarts maximums et les différences de dynamiques les plus marqués sont au profit du grand étang de 62 ha.

8.2.2.2 Le critère dominant de la profondeur dans la dissociation des masses d'eau

Sur l'analyse des trois étangs étudiés, le paramètre surfacique ne semble pas être prédominant dans la dissociation des masses d'eau, notamment avec l'étang de Rilhac et sa très petite taille dont les variations spatiales sont les plus élevées. En revanche, une tendance de variation des paramètres physico-chimiques semble s'observer en fonction de la profondeur du plan d'eau, dissociant le fonctionnement des petits plans d'eau de ceux plus profonds.

Plus la profondeur maximale est grande, plus les caractéristiques de la colonne d'eau tendent vers des traits lacustres et non plus stagnustres. Cependant, la profondeur ne peut être le seul élément de morphologie pris en compte dans l'analyse du bilan thermique. La profondeur moyenne est le déterminant majeur mis en avant par Gorham (1964) dans le bilan thermique des lacs, puisqu'elle est intégratrice de la profondeur maximale et de la superficie indirectement, dans l'idée où plus un lac est grand, plus il est profond. Cependant, des lacs comme le Balaton, grand et pelliculaire (Papon, 2007) ou des étangs comme celui de Rilhac, très petit et profond, remettent en question le critère de la profondeur moyenne et renforcent l'idée de l'importance de la profondeur relative utilisée par Hutchinson (1957), Wetzel (1983) et Hakanson (1996), ou de l'indice de creux développé par Delebecque (1896) et réutilisé par Meybeck (1995). L'indice de creux qui donne un aperçu simple et rapide de la forme du plan d'eau et donc, de sa capacité à développer une forte stratification thermique (Papon, 2007), à l'avantage d'intégrer la composante verticale et horizontale. L. Touchart (2001) a montré que son utilisation était une première approche, facile d'utilisation, pour distinguer les plans d'eau soumis avant tout à la convection mécanique (fonctionnement lacustre) et ceux d'abord soumis à la convection libre (fonctionnement stagnustre). En étang, il est préférable d'utiliser l'indice de creux moyen (Meybeck, 1995) qui utilise la profondeur

moyenne plutôt que celle maximale, celle-ci ne représentant souvent que la zone profonde au niveau de la chaussée, peu représentative de l'ensemble de la masse d'eau.

L'étang de Rilhac a un indice de creux moyen équivalent à celui de lacs très creux, avec une valeur de 31,6 ce qui lui confère une dynamique thermique proche de celle des lacs de grande profondeur absolue, avec des tendances saisonnières à la stratification thermique, mais pour des raisons différentes, sa superficie de 0,4 ha étant compensée par la très faible course du vent. Pendant la période estivale, l'étang n'est jamais brassé, sauf lors de fortes dépressions exceptionnelles (survenue une fois en 3 ans de mesures). Son brassage n'est effectué qu'à partir de l'automne, aux environs de la mi-octobre. Pour les deux autres étangs la Ramade et Baerenthal, leur indice de creux est proche avec respectivement des valeurs de 1,5 et 2,8. L'étang de Baerenthal compense sa profondeur maximale plus faible par un indice de creux supérieur. Il suit des cycles de stratification thermique directe et brassage alternant tous les 10 à 12 jours avec un maximum dépassant les 30 jours au plus chaud de l'été. Tandis que le plus profond des deux atteint des phases de 12 à 15 jours, avec un écart thermique entre la surface et le fond d'une durée maximale de 24 jours.

La connaissance de la profondeur maximale, de la profondeur moyenne ou des indices regroupant les paramètres morphologiques tel que l'indice de creux, reste le déterminant majeur de dissociation entre les masses d'eau dans la définition des systèmes lenticques (Forel, 1904, Pichler, 1939, Wilhem, 1960, Oertli *et al.*, 2000, Touchart, 2007), ainsi que dans leur analyse du bilan thermique (Hutchinson, 1957, Gorham, 1973, Allot, 1986). Ce paramètre semble se confirmer en étang et dominer face au paramètre surfacique à l'image de très petits étangs aux caractères lacustres.

8.2.2.3 Le bilan thermique comme solution de dissociation des masses d'eau ?

Le bilan thermique synthétise l'ensemble des paramètres climatiques, hydrologiques et physiques entre les processus externe et interne à la masse d'eau. Il a semblé être le déterminant le plus approprié pour distinguer des masses d'eau, englobant les caractéristiques surfaciques et de profondeur par l'utilisation du volume. D'après les recherches de Gorham (1964), la profondeur moyenne et le volume sont les deux éléments les plus corrélés avec le bilan thermique lacustre.

Lorsque l'on incorpore les étangs, soit des petits plans d'eau peu profonds, le volume n'est plus l'élément essentiel et seule la profondeur moyenne, au sens de Hakanson, a une corrélation forte avec le bilan thermique (Touchart, 2016). La présence d'étangs, comme celui de Rilhac, avec un bilan thermique élevé mais un volume très faible de 8 000 m³ du fait de sa très faible superficie, ne permet pas de suivre la logique lacustre où la profondeur et la superficie sont souvent corrélées. De fait, nous avons choisi d'analyser le bilan thermique afin d'obtenir la profondeur moyenne pouvant distinguer les étangs des lacs.

D'après l'analyse des 11 lacs et étangs, des tendances globales se dessinent et certains seuils semblent apparaître (Figure 106). Les plans d'eau compris entre 0,8 et 1,5 m de profondeur moyenne, au sens de Hakanson, ont un bilan thermique compris entre 2 000 et 3 000 cal/cm². Ces plans d'eau semblent atteindre un certain seuil de bilan thermique maximal lorsqu'ils ont une profondeur moyenne inférieure à 1,5 m. L'étang des Landes, plus grand étang Limousin supérieur à 100 ha de superficie, fait partie de ces plans d'eau très peu profonds au bilan thermique faible. Au-delà de cette valeur de profondeur moyenne, le bilan thermique atteint les 4 000 à 5 000 cal/cm². Ce gain est permis par le stockage des calories dans les couches plus profondes, alors impossible pour les plans d'eau peu profonds, même ceux dont la superficie est très grande.

L'exception du lac Martiska est liée probablement à sa localisation géographique (Estonie) en haute latitude et à la période exceptionnellement froide lors de la prise de mesure du maximum en juillet 2017, probablement éloignée du maximum annuel, du fait d'un printemps frais (-1,8°C) et d'un mois de juillet également plus froid que la normale (-1,1°C)⁵⁹. Pour les autres plans d'eau étudiés, les dynamiques semblent assez proches et l'on retrouve dans le même groupe des étangs très petits tel que Rilhac ainsi que le grand étang de Cieux de plus de 30 ha. Au-dessus des 5 000 calories, on entre dans un fonctionnement lacustre particulier, avec des plans d'eau assez profonds, dont la profondeur moyenne est supérieure à 3,5/4 m. Sur ces plans d'eau on retrouve les lacs irlandais d'une profondeur moyenne de 2,7 à 10,8 m.

⁵⁹ Données de la normale climatique de 1981 à 2010. Estonian Weather Service : <http://www.ilmateenistus.ee/>

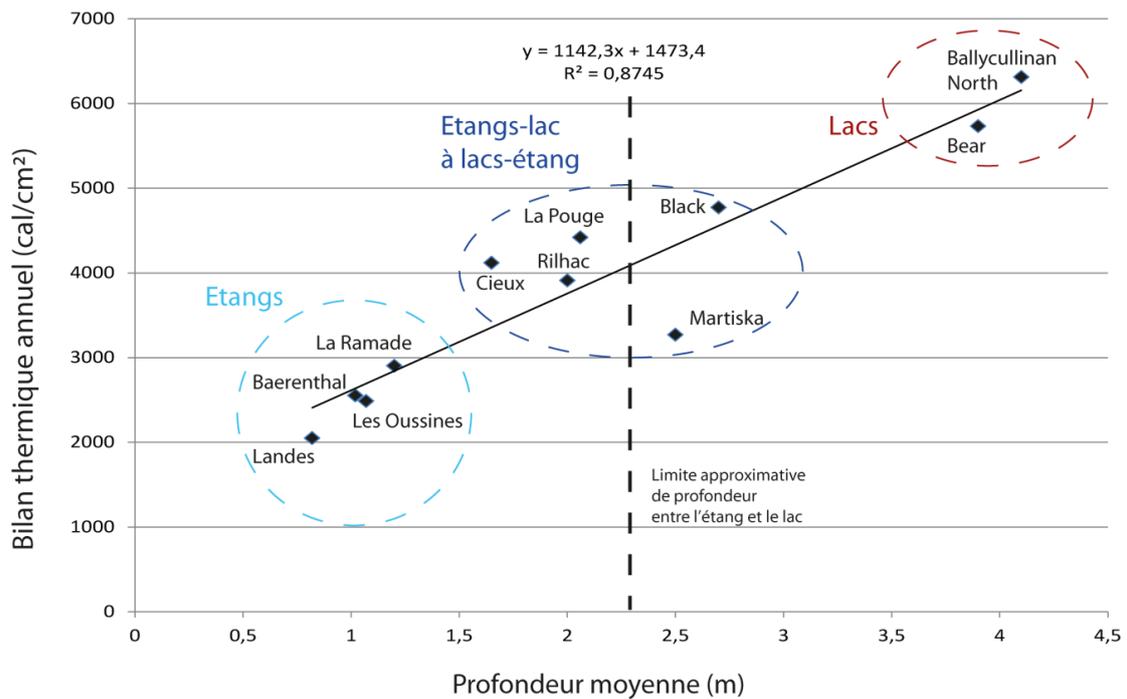


Figure 106: Dissociation des types de plans d'eau en fonction du bilan thermique et de la profondeur moyenne. Sources: Allot, 1986, Touchart, 2016. Q. Choffel, 2018

8.2.2.4 Classification des étangs selon leur profondeur moyenne et leur bilan thermique

L'analyse du graphique permet de distinguer les plans d'eau en trois composantes au fonctionnement distinct, plus ou moins lacustre ou stagnustre. Les plans d'eau entre 0,8 et 1,5 m de profondeurs peuvent être considérés comme des étangs à proprement parler. Leur caractéristique est liée à une stratification thermique établie sur quelques jours à dizaines de jours au maximum durant la période estivale. Ce sont des milieux à évolution rapide dont la profondeur permet de lutter contre le brassage par convection libre nocturne mais ne suffit pas à imposer une dynamique saisonnière, à l'image des étangs de la Ramade et de Baerenthal étudiés dans les chapitres précédents.

Entre les étangs et les lacs nous avons choisi d'intégrer deux groupes supplémentaires appelés étangs-lacs et lacs-étangs. Les étangs-lacs sont les plans d'eau compris entre 1,5 m et 2,5 m de profondeur moyenne, et de 3 500 à 4 500 cal/cm². Leur dynamique thermique est proche de celle lacustre du fait de leur forte profondeur relative, tout en gardant quelques traits stagnustres. Leur profondeur plus importante permet d'établir des phases de stratification sur plusieurs dizaines de jours à quelques mois, brassés pendant la période estivale seulement lors de fortes dépressions combinant un refroidissement atmosphérique avec un fort vent. Les lacs-étangs sont, à l'opposé, des plans d'eau naturels aux morphologies

proches de celle des étangs, avec une profondeur réduite et une faible superficie. La limite entre les deux, si elle ne réside pas dans l'aspect naturel/artificiel, peut être établie entre 2 et 2,5 m de profondeur moyenne (environ 4 500-4 700 cal/cm²). Cette limite suppose la distinction entre les étangs, qu'ils soient profond ou peu profonds, et les lacs, dont le bilan thermique est supérieur à 4 500 cal/cm² et plus profonds que 2,5 m en moyenne. Plus en profondeur, au-delà de 3 m⁶⁰ de profondeur moyenne, on trouve les lacs dont la dynamique est saisonnière, avec une stratification thermique établie sur l'ensemble de la période estivale, ne subissant un brassage qu'à l'arrivée de l'automne. Ces traits dimictiques puis monomictiques rappellent ceux des grands lacs largement étudiés.

⁶⁰ Les 3 m de profondeur moyenne n'est pas contradictoire avec les 6 m de profondeur maximale classique de la littérature limnologique séparant les étangs des lacs.

Conclusion partie IV

Dans un souci de gestion, cette dernière partie a montré l'intérêt de l'analyse de l'étang en trois dimensions, offrant des perspectives nouvelles afin de répondre à un besoin de peuplement piscicole d'eau froide en cours d'eau et ainsi limiter l'impact thermique du milieu stagnustre. Le centre thermique a été créé afin de répondre à un besoin de quantification et de cartographie des discontinuités thermiques des masses d'eau lacustres et stagnustres. Par son analyse en trois dimensions, il permet de mesurer la capacité du plan d'eau à développer une hétérogénéité thermique dans ses dimensions horizontales et sa dimension verticale liée aux ondulations de la thermocline. Le déplacement du centre thermique est influencé par les conditions météorologiques et morphologiques du plan d'eau, le vent jouant un rôle majeur sur les grands plans d'eau, tandis que la présence de zone d'ombrage ou l'arrivée d'un tributaire amène à des variations fortes pour les plans d'eau de superficie plus modeste.

Grâce à la capacité de certains systèmes d'alterner les profondeurs de sortie d'eau, ou lorsque l'étang dispose de plusieurs types de sorties, l'étude de l'évolution du centre thermique permet de connaître et anticiper des zones d'accumulation de chaleur en fonction des conditions climatiques. L'adaptation d'une profondeur de sortie choisie au préalable, en fonction de l'orientation du vent dominant permet de limiter l'impact thermique aval, tout comme la présence d'une zone ombragée sur un petit étang à déversoir. Pour ce dernier, la présence de l'ombrage peut limiter de 2 à 3°C le réchauffement du milieu aval, équivalent à la réduction thermique d'une dérivation.

L'analyse du volume du plan d'eau et des caractéristiques physico-chimiques de l'ensemble de la masse d'eau mettent en avant l'importance d'effectuer plusieurs points de mesure et à une fréquence élevée pour ces milieux à évolution rapide. La bathymétrie changeante et peu profonde de l'étang entraîne des variations importantes dans les températures et la structure thermique, dont l'influence peut se mesurer sur l'ensemble des paramètres physico-chimiques. La zone la plus profonde de l'étang, au niveau de la chaussée, n'est pas toujours représentative de la dynamique du milieu puisqu'elle jouit des plus fortes stratifications, quand d'autres bassins, secteurs ou baies peuvent n'être que rarement stratifiés. Dans cette optique, il semble opportun de proposer de réaliser des mesures en plusieurs points, ou si cela n'est pas possible, de prendre à minima le point le plus profond

et celui au centre de l'étang, afin de bénéficier de données plus représentatives du milieu stagnustre.

Enfin, le bilan thermique par son rôle intégrateur est un outil de dissociation des masses d'eau à l'échelle de l'étang, mais aussi à petite échelle cartographique, soit la différence entre les étangs et lacs. Le critère surfacique de base de la DCE séparant les masses d'eau cours d'eau de celles plans d'eau, estimé à 50 ha, ne représente pas la réalité des étangs dont la diversité de fonctionnement n'est pas influencée par la superficie mais bien par la profondeur moyenne et le bilan thermique. Ces deux éléments, corrélés entre eux, permettent de dissocier les étangs, de profondeur moyenne inférieure à 2,5 m et les lacs, plus profonds. La limite est fixée à environ 4500 cal/cm² pour un étang dont l'alternance de brassage et de stratification lui permet d'avoir un bilan thermique relativement élevé. Il semble donc opportun de ne pas utiliser le critère surfacique, à l'image d'un petit étang comme celui de Rilhac avec un bilan thermique élevé, mais bien d'utiliser le critère de profondeur pour dissocier les masses d'eau dont le fonctionnement thermique et physico-chimique permet d'établir une typologie des plans d'eau, de la mare au lac.

Conclusion générale

Avant le lancement de cette thèse de doctorat, l'homogénéité de la masse d'eau de l'étang (Loup, 1974) avait déjà été remise en cause dans la dimension verticale et discutée en fonction des échelles de temps (Touchart, 2001). Pour parvenir à une dimension supplémentaire, notre hypothèse principale, qui était l'hétérogénéité de l'étang en plan, a été confirmée tout au long de notre travail. Nous l'avons quantifiée et cartographiée, et nous avons étudié, caractérisé et discuté les causes de sa mise en place et de sa destruction. La morphologie tourmentée, en bassins plus ou moins indépendants, en baies plus ou moins fermées, la végétation encadrante, la course du vent au-dessus du plan d'eau et son influence sur la convection mécanique, forment trois des grands paramètres favorisant la distinction des masses d'eau dans les dimensions horizontales. Notre hypothèse secondaire n'a pu être confirmée au même niveau que la principale, notamment du fait que, pendant nos trois années de mesures, les étangs étudiés n'ont pas connu de modification de leurs aménagements hydrauliques (il n'y a pas eu, par exemple, de remplacement de déversoir par un moine, ou l'achèvement d'une dérivation). Nous avons pu néanmoins, d'une part cartographier les différences de température entre la chaussée et le centre des bassins, et donner quelques premières quantifications du temps pendant lequel la masse d'eau chaude est poussée en direction des sorties d'eau, d'autre part distinguer, dans l'étang de Baerenthal, le plus complexe de ce point de vue, les différentes masses d'eau les plus proches des différents systèmes d'aménagement hydrauliques.

L'analyse de trois étangs français de différentes morphologies, un grand étang moyennement profond, un petit étang profond et un étang intermédiaire en termes de profondeur et de superficie, a permis d'établir un modèle de fonctionnement thermique de ces milieux. Ces masses d'eau ont un fonctionnement distinct de celui du lac qu'il nous fallait caractériser et définir. L'étang, dont le modèle est basé sur les trois terrains d'études, suit une polymicticité discontinue avec une alternance de brassage et de stratifications de plusieurs jours à dizaines de jours. Cette alternance rapide amène, lors de chaque mélange faisant suite à une stratification directe, des calories jusque dans les couches de fond, générant la particularité du bilan thermique de ces milieux eu égard à celui des lacs. Nous avons mesuré un bilan thermique relativement élevé, entre 2 941 et 3 834 cal/cm², malgré la faible profondeur de ces petits plans d'eau. L'analyse des trois étangs étudiés lors de cette thèse, ainsi que l'apport de données issues d'autres étangs limousins (Touchart, 2001, 2007, 2016)

ou de lacs irlandais (Allot, 1986) et estoniens, ont permis de confirmer l'importance de la profondeur moyenne dans le calcul du bilan thermique des plans d'eau, déjà mise en avant par Gorham (1964). L'équation de ce dernier ne s'appliquant qu'aux grands lacs (Touchart, 2016), il a été nécessaire de créer une nouvelle équation afin d'estimer directement le bilan thermique des petits plans d'eau à partir de la connaissance de leur profondeur moyenne. L'équation a été testée et mesurée sur l'ancienne région administrative du Limousin, donnant un apport calorifique des 14 000 étangs compris entre $2,9^{E15}$ et $3,4^{E15}$ calories annuelles. A titre de comparaison, le Barrage de Bort les Orgues, situé dans la même région et recouvrant 10 % de la superficie totale des étangs, possède un apport calorifique représentant 80 % de celui de l'ensemble des petits plans d'eau limousins. Ces recherches permettent de dissocier les étangs des lacs et notamment des grands lacs dans leur fonctionnement thermique et leur contenance calorifique. La prise en considération de cette dissociation permet une meilleure approche de gestion des milieux aquatiques stagnustres.

Dans la littérature scientifique concernant la dissociation des masses d'eau, la composante horizontale est rarement prise en considération. Dans cette thèse, nous avons placé cet aspect de zonation thermique au centre de l'étude des petits plans d'eau. Le bilan thermique, calculé traditionnellement au point le plus profond a été comparé avec celui spatialisé, issu de plusieurs mesures au sein de l'étang. L'écart des valeurs entre un bilan thermique calculé au niveau de la chaussée, bien souvent éloigné du centre de gravité de l'étang, et celui spatialisé, est parfois supérieur à 15 %. Ces premières comparaisons mettent en évidence des écarts conséquents provoqués par le forçage externe principalement. Le besoin de cartographier et quantifier ces écarts nous a poussés à créer un nouvel indicateur basé sur les échanges calorifiques au sein des masses d'eau. Cet indicateur, que nous avons appelé le centre thermique (Choffel *et al.*, 2018), s'inspire du centre de gravité (Schmidt, 1928, Dussart, 1966) mais lui préfère les variations de température aux variations de densité. Une deuxième et troisième dimension, en latitude et longitude, ont ainsi été ajoutées. Ce nouvel indicateur permet une analyse fine de la répartition de la chaleur au sein de la masse d'eau en trois dimensions, quatre lorsque l'on fait varier ces écarts en fonction du temps. Ces variations ont été cartographiées et quantifiées et permettent de mieux comprendre la dispersion de chaleur influencée par les forçages externes et internes à la masse d'eau. Le centre thermique peut être utilisé afin de compléter les analyses sur la composante verticale

et ainsi utiliser la composante horizontale comme dissociation supplémentaire des masses d'eau stagnantes et lacustres.

La forme complexe des étangs, la présence de végétation arbustive sur leurs rives, l'arrivée d'eau par les tributaires ou par nappe sont autant d'éléments pouvant développer une hétérogénéité spatiale ponctuelle ou durable, et plus ou moins localisée dans l'étang. Nous avons pu démontrer que, même pour les plus petits d'entre eux, les étangs peuvent développer une hétérogénéité spatiale de la température. Cette zonation thermique est parfois ponctuelle, parfois durable ou cyclique, et son importance dépend du rapport entre le volume total de la masse d'eau et celui dont la température est modifiée. Sur un grand étang multilobé, le forçage externe provoqué par le vent est le principal facteur de dissociation thermique des masses d'eau. En fonction des vents dominants, celui-ci aura une importance plus ou moins réduite et une action plus ou moins en profondeur. Les écarts thermiques peuvent être importants, avec plus de 10°C de différence mesurés au sein de l'étang. Sur un très petit étang le vent n'a pas une course suffisante pour venir perturber la répartition de chaleur, si bien que d'autres facteurs, telle que la présence d'une ripisylve localisée en certains secteurs peuvent être la cause d'une hétérogénéité spatiale. La radiation solaire est réduite une partie de la journée dans la zone ombragée, limitant l'augmentation de température de surface. Les écarts entre la partie ombragée et ensoleillée de l'étang sont d'au maximum 3°C dans le cas de l'étang étudié. Les écarts ont lieu tous les jours ensoleillés du printemps à la fin de l'été, en général entre 11 heures et 20 heures, avant d'être détruits par le refroidissement nocturne affectant toute la masse d'eau. Ces écarts créent des mouvements de la thermocline entre les deux bassins amenant au développement d'oscillations thermiques semblables aux seiches internes mesurées en lac malgré la très faible superficie de l'étang. Les apports hydrologiques, s'ils sont à des températures différentes de celle du milieu lentique, entraînent des dissociations des masses d'eau mesurables par la température et la conductivité. Ces écarts dépendent du rapport entre le volume entrant et celui du plan d'eau. Pour un étang avec un temps de séjour court, le tributaire influence partiellement le fonctionnement thermique et cette perturbation est visible majoritairement au niveau de la queue de l'étang, lorsque les écarts de température sont les plus élevés. Les caractéristiques lotiques sont transformées en caractéristiques lenticques à environ 50 à 100 mètres de l'entrée fluviale. La plongée des eaux du cours d'eau

plus froid dans l'étang sont mesurables localement tandis qu'au niveau de la chaussée, l'arrivée du tributaire ne se fait plus ressentir. Sur des plans d'eau alimentés par l'eau de la nappe, une hétérogénéité spatiale de température peut être observée, bien souvent localisée en un ou plusieurs points du plan d'eau, là où la nappe est en contact avec la masse d'eau lenticulaire, sans toutefois affecter sa totalité. L'arrivée de nappe a été cartographiée grâce à la prise de mesure de température et de conductivité dans les couches de fond. Cette méthodologie prend tout son sens dans le cas d'arrivée d'eau souterraine et permet de localiser précisément les zones d'entrée. Lors de l'hiver ou en homothermie automnale il est possible de mesurer ces arrivées d'eau puisqu'elles constituent des panaches perturbant la structure thermique. En homothermie à 4°C, les zones d'arrivées d'eau de nappe sont les seules en stratification inverse alors que le reste du plan d'eau est en homothermie. A l'inverse, durant l'hiver, cet apport hydrologique d'eau souterraine plus chaude que la température de densité maximale vient renforcer et perturber la stratification inverse en certains secteurs, notamment pour les lacs dimictiques.

L'analyse spatiale des masses d'eau permet de modestes contributions dans une optique de gestion des milieux aquatiques stagnants. Actuellement, la plupart des propositions de gestion sont basées sur le fonctionnement vertical de l'étang. Notre étude propose une amélioration de la gestion, par la prise en compte des dimensions horizontales en plus de la dimension verticale. Nous avons mis en avant qu'il est possible d'analyser le plan d'eau comme une multitude de masses d'eau et ainsi apporter une possible solution à la contradiction ou au dilemme souffrant du besoin d'une eau chaude à l'intérieur de l'étang mais d'un déversement d'eau fraîche dans le cours d'eau aval. Le nouvel indicateur créé, le centre thermique, permet d'anticiper les diffusions de chaleur vers la chaussée à partir de la connaissance des données météorologiques. Lorsque l'étang dispose de plusieurs sorties d'eau, ou d'un moine pouvant faire intervenir le choix dans la profondeur de prise d'eau, l'analyse du centre thermique permet d'optimiser ces systèmes de gestion afin de limiter le risque thermique à l'aval. La connaissance des tendances générales du centre thermique permet une localisation cohérente, au préalable, de la sortie d'eau et du type de sortie préconisé. Face au vent dominant, une prise d'eau de fond ou de mi-fond va avoir une utilité réduite par la plongée des eaux chaudes de surface vers le fond. Sur les très petits étangs pour lesquels la superficie ne permet pas une course du vent sur la surface en eau, la

368

présence d'une zone ombragée au niveau du déversoir peut limiter considérablement l'impact thermique aval en réduisant la température de surface jusqu'à 3°C lors des phases de maximum thermique. La prise en compte d'une hétérogénéité spatiale de l'étang dans cette thèse remet en question l'efficacité d'une prise de mesure à un pas de temps réduit et à une seule profondeur pour ces petits plans d'eau à évolution rapide. La présence de baies, de zones ombragées recouvrant une grande partie de l'étang, de l'arrivée d'eau de source, d'un tributaire ou de nappe peuvent réduire l'efficacité de prise de mesure en un seul point. Cette méthodologie préconisée par la DCE 2000 pour les plans d'eau de plus de 50 ha peut s'étendre, par le souhait de cette dernière, à ceux de plus petite superficie et donc concerner de plus nombreux étangs. Les caractéristiques physico-chimiques, causées par une stratification plus forte à la chaussée que pour le reste de l'étang, ne sont pas nécessairement représentatifs de l'ensemble de la masse d'eau stagnante. Un suivi régulier et en plusieurs points permettrait de mieux diagnostiquer ces plans d'eau.

Enfin, le plan d'eau de barrage est considéré dans cette thèse comme un milieu au centre des échanges entre cours d'eau et plans d'eau. Il est récepteur de son milieu amont et moteur des caractéristiques aval. Il a donc été choisi d'étudier les influences des étangs de barrage en prenant en compte le fonctionnement interne de l'étang. Cette particularité met en avant l'importance des phases de brassage et de stratification dans l'étude d'impact des étangs. Pour les étangs à déversoir, les maxima à l'aval sont mesurés lors des phases de stratification des étangs. La capacité des étangs à se stratifier est d'autant plus forte que le plan d'eau est profond et le temps de séjour est long. C'est pour ces caractéristiques qu'il a été choisi dans cette étude de prendre en compte les calories comme mesure d'échanges entre le cours d'eau, sa température et son débit, et l'étang, sa température et son volume. Le volume de l'étang joue un rôle majeur dans l'impact thermique de celui-ci sur le cours d'eau, dissociant les petits plans d'eau peu volumiques, à l'impact faible, avec les grands étangs aux forts volumes dont l'influence aval mesurée est plus importante. Au même titre qu'il existe une différenciation au sein des étangs selon leur volume, cette particularité est d'autant plus vraie lorsqu'on l'applique entre les étangs et les lacs de barrage. Ces derniers ont une influence aval bien plus forte que les étangs, liée à leur volume pouvant dépasser le million de mètres cube, tandis qu'il atteint difficilement les quelques milliers à centaine de milliers de mètres cube en étang. Cette différence se fait ressentir dans la distance influencée dans le territoire

aval, inférieure à 10 km pour les plus grands étangs, alors qu'il peut dépasser les centaines de kilomètres pour les grands lacs de barrage.

Cette thèse de doctorat a la volonté de remettre en avant les apports d'une géographie limnologique pouvant répondre aux problématiques environnementales auxquelles sont soumis de nombreux plans d'eau, par la vision spatialisée des phénomènes stagnustres et lacustres. La représentation volumique des caractéristiques physico-chimiques permet une compréhension globale de ces plans d'eau dont le nom « plan d'eau » met lui-même en exergue l'importance des phénomènes en plan et pas seulement dans l'aspect vertical.

BIBLIOGRAPHIE

- ABBASI A, ANNOR F, & VAN DE GIESEN N.,2016. Investigation of Temperature Dynamics in Small and Shallow Reservoirs, Case Study: Lake Binaba, Upper East Region of Ghana. *Water*, Vol. 8, No. 3, p. 84.
- ADENIS A, COUSTEIX P, & PERPILLOU A.,1962. *Géographie du Limousin* ,Presses du Massif Central. Guéret.
- ALLOTT N A.,1986. Temperature, oxygen and heat-budgets of six small western Irish lakes. *Freshwater Biology*, Vol. 16, No. 2, p. 145-154.
- AMBROSETTI W, & BARBANTI L.,2001. Temperature, heat content, mixing and stability in Lake Orta: a pluriannual investigation. *Journal of Limnology*, Vol. 60, No. 1. doi:[10.4081/jlimnol.2001.60](https://doi.org/10.4081/jlimnol.2001.60)
- AMBROSETTI W, & BARBANTI L.,2002. Physical limnology of Italian lakes. 2. Relationships between morphometric parameters, stability and Birgean work. *J. Limnol*, Vol. 61, No. 2, p. 159-167.
- AMBROSETTI W, BARBANTI L, & SALA N.,2003. Residence time and physical processes in lakes. *J. Limnol*, No. 62, p. 1-15.
- AMOROS A, & PETTS G E.,1993. *Hydrosystèmes fluviaux*. Paris, Elsevier Masson.
- ANGELIER E.,2000. *Ecologie des eaux courantes* ,Techniques et documentation. Paris, 199 p.
- APEL J R.,1987. *Principles of ocean physics*. London ; Orlando, Academic Press, 634 p.
- ARRIGNON J.,1998. *Aménagement piscicole des eaux douces*. Londres, Lavoisier TEC & DOC.
- ARSENAULT R, WARE C, PLUMLEE M, MARTIN S, WHITCOMB L L, WILEY D, ...
- BILGILI A.,2004. A system for visualizing time varying oceanographic 3d data. In *Oceans* ,Vol. 2, p. 743-747. Kobe, Japan, IEEE.
- BAGLINIÈRE J L, & MAISSE G.,1991. *La truite: biologie et écologie* ,INRA Publ.. Paris.
- BAGLINIÈRE J L, MAISSE G, & COLLOQUE TRUITE.,1998. *La truite: biologie et écologie*. Paris, Institut national de la recherche agronomique.
- BALDWIN N S.,1957. Food Consumption and Growth of Brook Trout at Different Temperatures. *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol. 86, No. 1, p. 323-328.
- BANAS D.,2007. La sédimentation en étang et son hétérogénéité géographique. In *Géographie de l'étang* ,Sous la direction de Laurent Touchart, p. 103-117.
- BANAS D.,2016. L'étang de barrage: atout ou contrainte pour le bon état des eaux ? *Ecosystèmes*.
- BARTHOLOW J.,2000. Estimating cumulative effects of clear cutting on stream temperatures. *Rivers*, Vol. 7, p. 284-297.
- BARTOUT P.,2006. « Pour un référentiel des zones humides intérieures en milieu tempéré :

l'exemple des étangs en Limousin ,France » ,Thèse de doctorat en géographie. Université de Limoges, Limoges.

- BARTOUT P.,2015. L'incompréhension de la place prise par les plans d'eau dans l'Union européenne et ses conséquences réglementaires. *Norois*, No. 235, p. 17-36.
- BARTOUT P, & TOUCHART L.,2013. L'inventaire des plans d'eau français : outil d'une meilleure gestion des eaux de surface. *Annales de géographie*, Vol. 691, No. 3, p. 266.
- BARTOUT P, & TOUCHART L.,2016. La notion de limnité est-elle suffisante pour caractériser l'empreinte spatiale et sociétale des plans d'eau? *Revue géographique de l'Est*, Vol. 56, No. 1-2, p. 1-21.
- BATTIAU-QUENEY Y B.,1993. *Le relief de la France- COupes et croquis*. Paris, Elsevier Masson, 252 p.
- BAUER G.,1988. Threats to the Freshwater Pearl Mussel *Margaritifera margaritifera* L. in Central Europe. *Biological Conservation*, Vol. 45, p. 239-253.
- BAULIG H.,1928. *Le plateau Central de la France et sa bordure Méditerranéenne*. Paris, Armand Colin, 590p.
- BERGGREN M, STRÖM L, LAUDON H, KARLSSON J, JONSSON A, GIESLER R, ... JANSSON M.,2010. Lake secondary production fueled by rapid transfer of low molecular weight organic carbon from terrestrial sources to aquatic consumers: Terrestrial LMWC and lake secondary production. *Ecology Letters*, Vol. 13, No. 7, p. 870-880, mai.
- BIGGS J., VON FUMETTI S, & KELLY-QUINN M.,2017. The importance of small waterbodies for biodiversity and ecosystem services: implications for policy makers. *Hydrobiologia*, Vol. 793, No. 1, p. 3-39.
- BIGGS J., WILLIAMS P, WHITFIELD M, NICOLET P, & WEATHERBY A.,2005. 15 years of pond assessment in Britain: results and lessons learned from the work of Pond Conservation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, Vol. 15, No. 6, p. 693-714.
- BIRGE E A.,1909. An unregarded factor in lake temperatures. *Wisconsin Academy of Sciences, Arts, and Letters*, Vol. 5, p. 989-1017.
- BIRGE E A.,1915. The heat budgets of american and european lakes, p. 166–213.
- BIRGE E A.,1916. The work of the wind in warming a lake. *Transactions of the Wisconsin Academy of Sciences, Arts, and Letters.*, Vol. XVIII.
- BIRGE E, & JUDAY C.,1914. A Limnological Study of the Finger Lakes of New York.
- BIRKINSHAW S J, & WEBB B.,2010. Using temperature as a tracer to understand flow pathways in the Slapton Wood and Dunsop catchments. *Role of hydrology in managing consequences of a changing global environment.*, doi:[10.7558/bhs.2010.ic104](https://doi.org/10.7558/bhs.2010.ic104)

- BISHOP K, BUFFAM I, ERLANDSSON M, FÖLSTER J, LAUDON H, SEIBERT J, & TEMNERUD J.,2008. Aqua Incognita: the unknown headwaters. *Hydrological Processes*, Vol. 22, No. 8, p. 1239-1242.
- BOIX D, BIGGS J, CÉRÉGHINO R, HULL A P, KALETTKA T, & OERTLI B.,2012. Pond research and management in Europe: “Small is Beautiful”. *Hydrobiologia*, Vol. 689, No. 1, p. 1-9.
- BOLSENGA S J.,1975. Estimating energy budget components to determine Lake Huron evaporation. *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 5, p. 661-666.
- BOOTHBY J.,1997. Pond conservation: towards a delineation of pondscape. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems*, Vol. 7, p. 127-132.
- BOULEAU G, & PONT D.,2014. Les conditions de référence de la directive cadre européenne sur l'eau face à la dynamique des hydrosystèmes et des usages. *Natures Sciences Sociétés*, Vol. 22, No. 1, p. 3-14.
- BROOKER M P.,1981. The impact of impoundments on the downstream fisheries and general ecology of rivers. *Advances in applied biology*, Vol. 6, p. 91-152.
- BRUNAUD D.,2007. « Etangs pelliculaires et réserves naturelles: principes de fonctionnement et modalités de classement » ,Géographie. Université de Limoges, 579p.
- BRUNT D.,1927. The period of simple vertical oscillations in the atmosphere. . . *J. R. Meteorol. Soc*, Vol. 53, p. 30-32.
- BUBÍKOVÁ K, & HRIVNÁK R.,2018. Artificial ponds in Central Europe do not fall behind the natural ponds in terms of macrophyte diversity. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, No. 419, p. 8.
- BURKHOLDER B K, GRANT G E, HAGGERTY R, KHANGAONKAR T, & WAMPLER P J.,2008. Influence of hyporheic flow and geomorphology on temperature of a large, gravel-bed river, Clackamas River, Oregon, USA. *Hydrological Processes*, Vol. 22, No. 7, p. 941-953.
- CAISSIE D.,2006. The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*, Vol. 51, No. 8, p. 1389-1406.
- CARLINI M.,2006. « Morphologie et hydrodynamique des plans d'eau : le cas des étangs-lacs en Limousin » ,thesis. Université de Limoges, 362 p.
- CARLUER N, BABUT M, BELLIARD J, BERNEZ I, BURGER-LEENHARDT D, DORIOZ J, ... LEBLANC B.,2016. « Expertise scientifique collective sur l'impact cumulé des retenues » ,Rapport complet,. IRSTEA, 136 p..
- CASAMITJANA X, SERRA T, COLOMER J, BASERBA C, & PÉREZ-LOSADA J.,2003.

- Effects of the water withdrawal in the stratification patterns of a reservoir. *Hydrobiologia*, Vol. 504, No. 1-3, p. 21-28.
- CÉRÉGHINO R, BOIX D, CAUCHIE H-M, MARTENS K, & OERTLI B.,2013. The ecological role of ponds in a changing world. *Hydrobiologia*, Vol. 723, No. 1, p. 1-6.
- CHESTER E T, & ROBSON B J.,2013. Anthropogenic refuges for freshwater biodiversity: Their ecological characteristics and management. *Biological Conservation*, Vol. 166, p. 64-75.
- CHOFFEL Q, BARTOUT P, & TOUCHART L.,2017. La Ramade, un étang-frontière aux marges de la retenue de Bort-les-Orgues mais au coeur des problématiques environnementales. In *Actes du LXXIIIe congrès de la Fédération des sociétés savantes du centre de la France*, Vol. 24, p. 19-29. Guéret, Société des sciences naturelles, archéologiques et historiques de la Creuse.
- CHOFFEL Q, TOUCHART L, BARTOUT P, & AL DOMANY M.,2017. Temporal and spatial variations in heat content of a French pond. *Geographia Technica*, Vol. 12, No. 1, p. 9-22.
- CHOFFEL Q, TOUCHART L, BARTOUT P, & AL DOMANY M.,2018. Le centre thermique, nouvel outil de compréhension du bilan thermique et de l'évolution spatio-temporelle de la température d'un étang ? *Norois*, Vol. 246, No. 1, p. 57-73.
- CIZEL O.,2010. « Guide juridique d'accompagnement des bassins de Rhône–Méditerranée et de Corse ».
- COATES M J, & FOLKARD A M.,2009. The effects of littoral zone vegetation on turbulent mixing in lakes. *Ecological Modelling*, Vol. 220, No. 20, p. 2714-2726.
- COCKING A W.,1959. The effects of high temperatures on Roach ,*Rutilus Rutilus*. *Journal of experimental Biology*, No. 36, p. 217-226.
- CONDIE S A, & WEBSTER I T.,2001. Estimating Stratification in Shallow Water Bodies from Mean Meteorological Conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 4, p. 286-292.
- COQ M.,1976. Les climats du Limousin. Contribution à l'étude biogéographique du Massif Central de la France. *Norois*, Vol. 89, No. 1, p. 95-108.
- COSANDEY C, & ROBINSON M.,2000. *Hydrologie continentale*. Armand Colin, 448 p.
- COUTTS A M, TAPPER N J, BERINGER J, LOUGHNAN M, & DEMUZERE M.,2013. Watering our cities: The capacity for Water Sensitive Urban Design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context. *Progress in Physical Geography*, Vol. 37, No. 1, p. 2-28.
- DANIS P-A.,2003, décembre 16. « Modélisation du fonctionnement thermique, hydrologique et isotopique de systèmes lacustres : sensibilité aux changements climatiques et amélioration

- des reconstructions paléoclimatiques » ,phdthesis. Université de Savoie, 198 p.
- DAVIES B, BIGGS J, WILLIAMS P, WHITFIELD M, NICOLET P, SEAR D, ... MAUND S.,2008. Comparative biodiversity of aquatic habitats in the European agricultural landscape. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Vol. 125, No. 1-4, p. 1-8.
- DE SAUSSURE H-B.,1779. *Voyages dans les alpes* ,Samuel Fauche, Imprimeur et Libraire du roi, Vol. Tome premier. Neuchâtel.
- DELEBECQUE A.,1896. *Les lacs français* ,Chamerot & Renouard. Paris, 436 p.
- DEMANGEON A.,1910. Le relief du Limousin. *Annales de Géographie*, Vol. 19, No. 104, p. 120-149.
- DÉSIRÉ-MARCHAND J, & KLEIN C.,1986. Le relief du Limousin. Les avatars d'un géomorphotype. *Norois*, Vol. 129, p. 23-49.
- Directive 2000/60/CE du Parlement Européen et du Conseil.,2000, octobre. Journal officiel des Communautés européennes.
- DOWNING J A.,2010. Emerging global role of small lakes and ponds: little things mean a lot. *Limnetica*, Vol. 1, No. 29, p. 9-24.
- DUGDALE S J, BERGERON N E, & ST-HILAIRE A.,2013. Temporal variability of thermal refuges and water temperature patterns in an Atlantic salmon river. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 136, p. 358-373.
- DUGDALE S J, BERGERON N E, & ST-HILAIRE A.,2015. Spatial distribution of thermal refuges analysed in relation to riverscape hydromorphology using airborne thermal infrared imagery. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 160, p. 43-55.
- DUNALSKA J.,2002. Influence of Limited Water Flow in a Pipeline on the Nutrients Budget in a Lake Restored by Hypolimnetic Withdrawal Method. *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 11, No. 6, p. 631-637.
- DUNALSKA J A, WIŚNIEWSKI G, & MIENCKI C.,2007. Assessment of multi-year ,1956–2003 hypolimnetic withdrawal from Lake Kortowskie, Poland. *Lake and Reservoir Management*, Vol. 23, No. 4, p. 377-387.
- DUSSART B.,1966. *Limnologie, l'étude des eaux continentales* ,Gauthier Villars. Paris, 681 p.
- ECKEL V O.,1950. Ober die numerische und graphische Ermittlung der Stabilität von Gewässern nach W. Schmidt. *Hydrol.*, p. 38-46.
- ESTIENNE P, & GODARD A.,1998. *Climatologie*. Paris, Armand Colin.
- EUROPEAN POND CONSERVATION NETWORK.,2009. « Manifeste pour les mares et les étangs » ,p. 20.
- EUZENAT G, & FOURNEL F.,1976. « Recherche sur la truite commune ,*Salmo Trutta* dans une

- rivière de Bretagne, le Scorff ». Univ. Rennes, 213 p.
- FAIRCHILD G W, & VELINSKY D J.,2006. Effects of Small Ponds on Stream Water Chemistry. *Lake and Reservoir Management*, Vol. 22, No. 4, p. 321-330.
- FERREIRA V, & CHAUVET E.,2011. Synergistic effects of water temperature and dissolved nutrients on litter decomposition and associated fungi: global change and litter decomposition. *Global Change Biology*, Vol. 17, No. 1, p. 551-564.
- FLAGEOLLET J-C.,2008. Morpho-structures vosgiennes. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, Vol. 14, No. vol. 14-n° 2, p. 75-86.
- FOLKARD A M, SHERBORNE A J, & COATES M J.,2007. Turbulence and stratification in Priest Pot, a productive pond in a sheltered environment. *Limnology*, Vol. 8, No. 2, p. 113-120.
- FOUR B.,2017. « Effet des étangs de barrage à vocation piscicole sur le fonctionnement écologique des cours d'eau de tête de bassin dans des contextes environnementaux différents : le cas des étangs de plaine en Lorraine ». Université de Lorraine, 226 p.
- GAILLARD J.,2014. « Rôle des étangs de barrage à vocation piscicole dans la dynamique des micropolluants en têtes de bassins versants ». Université de Lorraine, 226 p.
- GAILLARD J, THOMAS M, IURETIG A, PALLEZ C, FEIDT C, DAUCHY X, & BANAS D.,2016. Barrage fishponds: Reduction of pesticide concentration peaks and associated risk of adverse ecological effects in headwater streams. *Journal of Environmental Management*, Vol. 169, p. 261-271.
- GAILLARD J, THOMAS M, LAZARTIGUES A, BONNEFILLE B, PALLEZ C, DAUCHY X, ... BANAS D.,2016. Potential of barrage fish ponds for the mitigation of pesticide pollution in streams. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 23, No. 1, p. 23-35.
- GELLER W.,1992. The temperature stratification and related characteristics of Chilean lakes in midsummer. *Aquatic Sciences*, Vol. 54, No. 1, p. 37-57.
- GENEST C.,2007. La définition de l'étang en géographie linguistique. In *Géographie de l'étang : des théories globales aux pratiques locales* ,L'Harmattan, p. 55-85. Paris.
- GERMAINE M A, & BARRAUD R.,2017. *Démanteler les barrages pour restaurer les cours d'eau: Controverses et représentations*. Quae, 260 p.
- GEYER W R, MORRIS J T, PRAHL F G, & JAY D A.,2000. Interaction between physical processes and ecosystem structure: a comparative approach, in: Hobbie, J.E. (Ed.) *Estuarine science: a synthetic approach to research and practice*. pp. 177-206.
- GILL A E.,1982. *Atmosphere-ocean dynamics*. San Diego, Acad. Press, 662 p.
- GOFFAUX D.,1997. « Incidence du régime thermique sur l'utilisation du temps et de l'espace

- par la truite commune ,*Salmo trutta* dans une rivière salmonicole, l'Aisne. » ,Mémoire de Licence en Sciences Biologiques. LDPA-Université de Liège, 50 p.
- GOLDMAN C R, & HORNE A J.,1983. *Limnology*. New York, McGraw-Hill, 464 p.
- GOLUS W, & BAJKIEWICZ-GRABOWSKA E.,2017. Water circulation in the moraine ponds of northern Poland. *Hydrobiologia*, Vol. 793, No. 1, p. 55-65.
- GORCEIX C, & KREITMANN L.,1930. Etude thermique de « La Bataillère » sur le Léman. *Revue de géographie alpine*, Vol. 18, No. 3, p. 537-551.
- GUILCHER A.,1965. *Précis d'hydrologie marine et continentale*. Masson et Cie, 387 p.
- HÅKANSON L.,1996. A new, simple, general technique to predict seasonal variability of river discharge and lake temperature for lake ecosystem models. *Ecological Modelling*, Vol. 88, No. 1-3, p. 157-181.
- HAMILTON D P, & MITCHELL S F.,1996. An empirical model for sediment resuspension in shallow lakes. *Hydrobiologia*, Vol. 317, No. 3, p. 209-220.
- HAYES N M, DEEMER B R, CORMAN J R, RAZAVI N R, & STROCK K E.,2017. Key differences between lakes and reservoirs modify climate signals: A case for a new conceptual model: Lakes and reservoirs modify climate signals. *Limnology and Oceanography Letters*, Vol. 2, No. 2, p. 47-62.
- HENDERSON-SELLERS B.,1986. Calculating the surface energy balance for lake and reservoir modeling: A review. *Reviews of Geophysics*, Vol. 24, No. 3, p. 625-649.
- HALBFASS W.,1923. *Grundzüge einer vergleichenden Seenkunde* ,Bornträger. Berlin, 354 p.
- HOAR W S.,1942. Diurnal Variations in Feeding Activity of Young Salmon and Trout. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, Vol. 6a, No. 1, p. 90-101.
- HOSTETLER S W, BATES G T, & GIORGI F.,1993. Interactive coupling of a lake thermal model with a regional climate model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 98, No. D3, p. 5045-5057.
- HUFTY A.,2001. *Introduction à la climatologie: le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine*. Presses Université Laval, 596 p.
- HUTCHINSON G E.,1957. *Treatise on Limnology* ,Jonh Wiley & sons, INC, Vol. I. New York, 1015 p.
- IDSO S B.,1973. On the concept of lake stability. *Limnology and Oceanography*, Vol. 18, No. 4, p. 681-683.
- IMBERGER J.,1985. The diurnal mixed layer1. *Limnology and Oceanography*, Vol. 30, No. 4, p. 737-770.
- IMBERGER JöRg, & PATTERSON J.,1981. A dynamic eservoir simulation model-DYRESM:5.

Transport models for inland and coastal waters.

- JALABERT B, & FOSTIER A.,2010. *La truite arc-en-ciel: De la biologie à l'élevage*. Editions Quae, 338 p.
- JÉHIN P.,2007. Rivières, étangs et pisciculture dans les Vosges du Nord avant la Révolution. *Annales scientifiques de la Réserve Biosphère transfrontalière Vosges de Nord-Pfälzerwald*, Vol. 13, p. 91-112.
- KETTLE A J, HUGHES C, UNAZI G A, BIRCH L, MOHIE-EL-DIN H, & JONES M R.,2012. Role of groundwater exchange on the energy budget and seasonal stratification of a shallow temperate lake. *Journal of Hydrology*, Vol. 470–471, p. 12-27.
- KIMURA N, WU C H, HOOPEES J A, & TAI A.,2016. Diurnal Dynamics in a Small Shallow Lake under Spatially Nonuniform Wind and Weak Stratification. *Journal of Hydraulic Engineering*, p. 04016047.
- LA JEUNESSE I, & QUEVAUVILLER P.,2016. *Changement climatique et cycle de l'eau: impacts, adaptation, législation et avancées scientifiques*. Paris, Lavoisier, 325 p.
- LAM N S-N.,1983. Spatial Interpolation Methods: A Review. *The American Cartographer*, Vol. 10, No. 2, p. 129-150.
- LAUNEAU P, GIRAUD M, ROBIN M, & BALTZER A.,2019. Full-Waveform LiDAR Fast Analysis of a Moderately Turbid Bay in Western France. *Remote Sensing*, Vol. 11, No. 2, p. 117.
- LE CALVEZ C.,2017. « Les usagers confrontés à la restauration de la continuité écologique des cours d'eau. Approche en région Bretagne » ,Thèse de doctorat en géographie. Rennes 2, 433 p.
- LE COZ J, CAMENEN B, DRAMAIS G, RIBOT-BRUNO J, FERRY M, & ROSIQUE J-L.,2011. « Contrôle des débits réglementaires. Application de l'article L. 2014-18 du Code de l'environnement » ,p. 132. Vincennes: ONEMA.
- LEBEDEV V N.,1939. The problem of quantitative determination of temperature conditions in fresh water lakes with reference to the factors affecting it. *Association internationale d'hydrologie scientifique*, Vol. I, p. 13.
- LEDOUX H, & GOLD C M.,2008. Modelling three-dimensional geoscientific fields with the Voronoi diagram and its dual. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 22, No. 5, p. 547-574.
- LEMMIN U.,1995. Limnologie physique. In *Limnologie générale* ,Masson. Paris.
- LESSARD J L, & HAYES D B.,2003. Effects of elevated water temperature on fish and macroinvertebrate communities below small dams. *River Research and Applications*, Vol. 380

19, No. 7, p. 721-732.

- LÉVÊQUE C.,2016. *Quelles rivières pour demain? réflexions sur l'écologie et la restauration des cours d'eau*. Versailles, France, Éditions Quæ, 287 p.
- LÉVÊQUE Christian, MUXART T, ABBADIE L, & WEIL A.,2003. L'anthroposystème: entité structurelle et fonctionnelle des interactions sociétés-milieux. In *Quelles natures voulons-nous ?* ,Elsevier, p. 110-129.
- LEWIS J.,1983. A revised classification of lakes based on mixing. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 40 :1779-1787..
- LHÉRITIER N.,2012. « Les têtes de bassin: de la cartographie aux échelles mondiales et française à la caractérisation des ruissaux limousins » ,Géographie. Université de Limoges, 481 p.
- LIKENS G E, & JOHNSON N M.,1969. Measurement and Analysis of the Annual Heat Budget for the Sediments in Two Wisconsin Lakes1. *Limnology and Oceanography*, Vol. 14, No. 1, p. 115-135.
- LOSORDO T M, & PIEDRAHITA R H.,1991. Modelling temperature variation and thermal stratification in shallow aquaculture ponds. *Ecological Modelling*, No. 54, p. 189-226.
- LOUP J.,1974. *Les eaux terrestres* ,Masson. Paris, 174 p.
- LUNDY L, & WADE R.,2011. Integrating sciences to sustain urban ecosystem services. *Progress in Physical Geography*, Vol. 35, No. 5, p. 653-669.
- MAGEE M R, & WU C H.,2017. Response of water temperatures and stratification to changing climate in three lakes with different morphometry. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 21, No. 12, p. 6253-6274.
- MAHEU A., ST-HILAIRE A, CAISSIE D, & EL-JABI N.,2016. Understanding the Thermal Regime of Rivers Influenced by Small and Medium Size Dams in Eastern Canada. *River Research and Applications*. doi:[10.1002/rra.3046](https://doi.org/10.1002/rra.3046)
- MAHEU Audrey.,2015. « Développement d'outils de caractérisation et de modélisation du régime thermique des rivières naturelles et régulées ». Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique - Centre Eau-Terre-Environnement, 226 p.
- MAHEU Audrey, ST-HILAIRE A, CAISSIE D, EL-JABI N, BOURQUE G, & BOISCLAIR D.,2016. A regional analysis of the impact of dams on water temperature in medium-size rivers in eastern Canada. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 73, No. 12, p. 1885-1897.
- MARKFORT C D, PEREZ A L S, THILL J W, JASTER D A, PORTÉ-AGEL F, & STEFAN H G.,2010. Wind sheltering of a lake by a tree canopy or bluff topography. *Water Resources* 381

Research, Vol. 46, No. 3, p. W03530.

- MARTÍNEZ-PAZ P, MORALES M, MARTÍN R, MARTÍNEZ-GUITARTE J L, & MORCILLO G.,2014. Characterization of the small heat shock protein Hsp27 gene in *Chironomus riparius* ,Diptera and its expression profile in response to temperature changes and xenobiotic exposures. *Cell Stress and Chaperones*, Vol. 19, No. 4, p. 529-540.
- MARZECOVÁ A, MIKOMÄGI A, KOFF T, & MARTMA T.,2011. Sedimentary geochemical response to human impact on Lake Nõmmejärv, Estonia. *Estonian Journal of Ecology*, Vol. 60, No. 1, p. 54.
- MASSON G, BANAS D, FRANÇOIS D, CIZEL O, LEGLIZE L, DIDIER S, & CORBONNOIS J.,2005. Vidange des étangs piscicoles : contraintes réglementaires et d'exploitation et Incidences environnementales ,Emptying of extensive fishponds : practices, control and environmental incidences. *Bulletin de l'Association de géographes français*, Vol. 82, No. 2, p. 224-233.
- MATHIS D, & MATHIS A.,2016. Anciens et nouveaux terroirs d'étangs en Lorraine. *Revue géographique de l'Est*, Vol. 56, No. 1-2, p. 1-20.
- MELIN R.,1939. Temperature observations in Swedish lakes. *Association internationale d'hydrologie scientifique*, Vol. 1.
- MEYBECK M, KUMMU M, & DÜRR H H.,2013. Global hydrobelts and hydroregions: improved reporting scale for water-related issues? *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 17, No. 3, p. 1093-1111.
- MIENTKI C, & TEODOROWICZ M.,1996. Assessment of the Effects of Hypolimnion Water Removal from the Kortowskie Lake. In L. Pawłowski, W. J. Lacy, C. G. Uchrin, & M. R. Dudzińska ,Éd., *Chemistry for the Protection of the Environment 2* ,p. 361-374.
- 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 ». Université d'Orléans, 262 p.
- MIRAS Y.,2004. « L'analyse pollinique du plateau de Millevaches ,Massif Central et de sites périphériques limousins et auvergnats : approches des paléoenvironnements, des systèmes agro-pastoraux et évolution des territoires ruraux » ,Thèse de doctorat de Sciences et Vie. Université de Franche-Comté, Besaçon, 301 p.
- MONISMITH S G.,1985. Wind-forced motions in stratified lakes and their effect on mixed-layer shear. *American Society of Limnology and Oceanography*, Vol. 30, No. 4, p. 771-783.
- MONISMITH S G, IMBERGER J, & MORISON M L.,1990. Convective motions in the sidearm of a small reservoir. *Limnology and Oceanography*, Vol. 35, No. 8, p. 1676-1702.

- MONSEN N E, CLOERN J E, LUCAS L V, & MONISMITH S G.,2002. A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. *Limnology and Oceanography*, Vol. 47, No. 5, p. 1545-1553.
- MOORKENS E A.,2000. Conservation management of the freshwater pearl mussel. *Irish Wildlife Manuals*, Vol. 9, p. 1-44.
- MORANDI B, PIÉGAY H, LAMOUREUX N, & VAUDOR L.,2014. How is success or failure in river restoration projects evaluated? Feedback from French restoration projects. *Journal of Environmental Management*, Vol. 137, p. 178-188.
- MORTIMER C H.,1952. Water movements in lakes during summer stratification; evidence from the distribution of temperature in Windermere. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, Vol. 236, No. 635, p. 355-398.
- MORTIMER C H.,1981. The oxygen content of air-saturated fresh waters over ranges of temperature and atmospheric pressure of limnological interest. *Mitt. Int. Ver. Limnol*, Vol. 22, p. 23-56.
- MURPHY S C, COLLINS N C, & DOKA S E.,2012. Determinants of temperature in small coastal embayments of Lake Ontario. *Journal of Great Lakes Research*, Vol. 38, No. 4, p. 600-609.
- NAGARAJAN B, YAU M K, & SCHUEPP P H.,2004. The effects of small water bodies on the atmospheric heat and water budgets over the MacKenzie River Basin. *Hydrological Processes*, Vol. 18, No. 5, p. 913-938.
- NAGASAKA A, & NAKAMURA F.,1999. The influences of land-use changes on hydrology and riparian environment in a northern Japanese landscape. *Landscape Ecology*, Vol. 14, No. 6, p. 543-556.
- OERTLI B, AUDERSEY JOYE D, CASTELLA E, LACHAVANNE J-B, & JUGE R.,2000. « Biological diversity and ecological classification of ponds and small lakes of Switzerland » ,p. 347. Université de Genève, 347 p.
- OERTLI B, & FROSSARD P-A.,2013. *Mares et étangs* ,Presses polytechniques et universitaires romandes. Italie, 473 p.
- OLSZEWSKI P.,1971. Seeking the effective ways of lakes degradation prevention [English version]. *Zesz. nauk. WSR Olszt.*, Vol. 3, p. 1-23.
- OTTOSSON F, & ABRAHAMSSON O.,1998. Presentation and analysis of a model simulating epilimnetic and hypolimnetic temperatures in lakes. *Ecological Modelling*, No. 110, p. 233-253.
- OVIDIO M.,1999. Cycle annuel d'activité de la truite commune ,*Salmo trutta L. adulte*: étude par

- radio-pistage dans un cours d'eau de l'Ardenne belge. *Bull. Fr. Pêche Piscic*, Vol. 352, p. 01-18.
- PAPON P.,2007. « Les plans d'eau superficiels: définition, fonctionnement et aménagement ». Université de Limoges, 316 p.
- PAPON P, & TOUCHART L.,2003. Le Balaton, archétype du lac-étang? / Balaton Lake: the archetypal lake-pond? *Annales de Géographie*, Vol. 112, No. 632, p. 339-356.
- PEETERS F, LIVINGSTONE D M, GOUDSMIT G-H, KIPFER R, & FORSTER R.,2002. Modeling 50 years of historical temperature profiles in a large central European lake. *Limnology and Oceanography*, Vol. 47, No. 1, p. 186-197.
- PERPILLOU A.,1940. *Le Limousin, étude de géographie physique régionale*. Chartres, 257 p.
- PERRIAUX J.,1961. « Contribution à la géologie des Vosges gréseuses ». Université de Strasbourg, 240 p.
- PEYRAT J-M.,1975. Les sols en Limousin et leur perméabilité. *Norois*, Vol. 88, No. 1, p. 639-648.
- PICCOLROAZ S, TOFFOLON M, & MAJONE B.,2013. A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperature in lakes. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 17, No. 8, p. 3323-3338.
- PICHLER W.,1939. Unsere derzeitige Kenntnis von der Thermik kleiner Gewässer. Thermische Kleingewässertypen. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, Vol. 38, No. 1-6, p. 231-242.
- PIÉGAY H, PAUTOU G, & RUFFINONI C.,2003. *Les forêts riveraines des cours d'eau: écologie, fonctions et gestion*. Paris, IDF, Institut pour le développement forestier, 463 p.
- POFF N L, & HART D D.,2002. How Dams Vary and Why It Matters for the Emerging Science of Dam Removal. *BioScience*, Vol. 52, No. 8, p. 659-668.
- POTTS D J.,2004. « The heat budget of Quesnel lake ». University of British Columbia, Vancouver, Canada, 80 p..
- POURRIOT R, & MEYBECK M.,1995. *Limnologie générale* ,Masson. Paris, 956 p.
- PRATS J, & DANIS P-A.,2018. « Estimation des conditions de référence et seuils de qualité pour le paramètre "température de l'eau" en plans d'eau ». Convention AFB-Irstea, 43 p.
- PRATS J, REYNAUD N, REBIÈRE D, PEROUX T, TORMOS T, & DANIS P-A.,2018. LakeSST: Lake Skin Surface Temperature in French inland water bodies for 1999–2016 from Landsat archives. *Earth System Science Data*, Vol. 10, No. 2, p. 727-743.
- PRATS J, SALENÇON M-J, GANT M, & DANIS P-A.,2017. Simulation of the hydrodynamic behaviour of a Mediterranean reservoir under different climate change and management

- scenarios. *Journal of Limnology*, Vol. 77, No. 1, p. 62 :81.
- PULINA M.,2005. Les karsts des zones tempérées froides à pergélisol. In *Les karsts des régions climatiques extrêmes* ,Presses Universitaires de Bordeaux, Vol. 14, p. 220p. :57-100.
- RAGOTZKIE R A.,1978. Heat budgets of Lakes. In *Lakes: Chemistry, Geology, Physics* ,Springer, p. 1-18. New York, Abraham Lerman.
- RALEIGH R F.,1982. *Habitat suitability index models: brook trout* ,US. Dep. Int., 42 p.
- READ J S, HAMILTON D P, JONES I D, MURAOKA K, WINSLOW L A, KROISS R, ...
 GAISER E.,2011. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 26, No. 11, p. 1325-1336.
- REAVIE E D, BARBIERO R P, ALLINGER L E, & WARREN G J.,2014. Phytoplankton trends in the Great Lakes, 2001–2011. *Journal of Great Lakes Research*, Vol. 40, No. 3, p. 618-639.
- REIF C B.,1969. Temperature profiles and heat flow in sediments of Nuangola. *Proceedings of the Pennsylvania Academy of Science*, Vol. 43, p. 98-100.
- ROUBEIX V, PRATS J, & PIERRE-ALAIN DANIS.,2018. linking water quality to lake size: a database analysis, Poster, 1 p.
- ROUGERIE G.,1996. Géographie physique globale, science du paysage, environnement. In *Composantes et concepts de la géographie physique* ,Armand Colin, p. 155-165.
- ROUX A-L.,1982. *Cartographie polythématique appliqué à la gestion écologique des eaux, étude d'un hydrosystème fluvial : le Haut Rhône français* ,Editions du CNRS. Paris, 116 p.
- ROY M L, & LE PICHON C.,2017. Modelling functional fish habitat connectivity in rivers: A case study for prioritizing restoration actions targeting brown trout. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, Vol. 27, No. 5, p. 927-937.
- ROY R.,2014. « Distribution spatiale et activité des poissons en milieu lacustre: impacts des facteurs environnementaux partir d'une approche multi-échelle. Application à la retenue des Bariousses ». Aix-Marseille université, 224 p.
- RUEDA F J, & COWEN E A.,2005. Exchange between a freshwater embayment and a large lake through a long, shallow channel. *Limnology and Oceanography*, Vol. 50, No. 1, p. 169-183.
- RUTHERFORD J C, MARSH N A, DAVIES P M, & BUNN S E.,2004. Effects of patchy shade on stream water temperature: how quickly do small streams heat and cool? *Marine and Freshwater Research*, Vol. 55, No. 8, p. 737-748.
- SAHLIN J.,2014. « Modélisation et interpolation 3D pour l'étude de l'écosystème pélagique marin ». Québec, Canada, 127 p.
- SALENÇON M-J, & THÉBAULT J-M.,1994. Modélisation de l'écosystème du Lac de Pareloup avec les modèles ASTER et MELODIA. *Hydroécologie Appliquée*, Vol. 6, p. 369-426.

- SAVY B.,2006. *Hydro-limnologie du haut bassin de la Charente : une approche géographique appliquée aux relations lac de barrage - émissaire : la température de l'eau en aval des lacs de Lavaud et Mas Chaban*. Thèse de doctorat de l'université de Limoges, Limoges, 375 p.
- SCHEFFER M.,1999. The effect of aquatic vegetation on turbidity; how important are the filter feeders? *Hydrobiologia*, No. 408/409, p. 307-316.
- SCHLUMBERGER O, & GIRARD P.,2013. *Mémento de pisciculture d'étang*. Versailles, France, Éditions Quæ, 227 p.
- SCHMIDT W.,1915. Uber den Energiegehalt der Seen. *Int. Rev. Hydrogr. Supplz*, Vol. 7, p. 2-25.
- SCHMIDT W.,1928. Über die Temperatur-und tabilitätsverhältnisse von Seen. *Geografiska Annaler*, Vol. 10, p. 145-177.
- SECONDAT M.,1952. Les variations de la température et de la concentration en oxygène dissous des eaux lacustres et des eaux courantes. Leur retentissement sur la distribution des poissons. *Bulletin Français de Pisciculture*, No. 167, p. 52-59.
- SERRUYA C.,2012. *Lake Kinneret*. Springer Science & Business Media, 480 p.
- SHIMODA Y, AZIM M E, PERHAR G, RAMIN M, KENNEY M A, SADRADDINI S, ... ARHONDITSIS G B.,2011. Our current understanding of lake ecosystem response to climate change: What have we really learned from the north temperate deep lakes? *Journal of Great Lakes Research*, Vol. 37, No. 1, p. 173-193.
- SIMA S, AHMADALIPOUR A, & TAJRISHY M.,2013. Mapping surface temperature in a hyper-saline lake and investigating the effect of temperature distribution on the lake evaporation. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 136, p. 374-385.
- SOMERS K A, BERNHARDT E S, GRACE J B, HASSETT B A, SUDDUTH E B, WANG S, & URBAN D L.,2013. Streams in the urban heat island: spatial and temporal variability in temperature. *Freshwater Science*, Vol. 32, No. 1, p. 309-326.
- SOUCHON Y.,1994. État d'avancement des recherches sur la modélisation de l'habitat des poissons des cours d'eau en France. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, No. 332, p. 57-71.
- SOULIGNAC F.,2017. « Apport de la modélisation tridimensionnelle pour la compréhension du fonctionnement des écosystèmes lacustres et l'évaluation de leur état écologique ». Thèse de Doctorat de l'université Paris-Est, Paris, 269 p.
- SOULIGNAC F, DANIS P-A, BOUFFARD D, CHANUDET V, DAMBRINE E, GUÉNAND Y, ... ANNEVILLE O.,2018. Using 3D modeling and remote sensing capabilities for a better understanding of spatio-temporal heterogeneities of phytoplankton abundance in large lakes. *Journal of Great Lakes Research*, Vol. 44, No. 4, p. 756-764.

- SOULIGNAC F, VINÇON-LEITE B, LEMAIRE B J, SCARATI MARTINS J R, BONHOMME C, DUBOIS P, ... TASSIN B.,2017. Performance Assessment of a 3D Hydrodynamic Model Using High Temporal Resolution Measurements in a Shallow Urban Lake. *Environmental Modeling & Assessment*, Vol. 22, No. 4, p. 309-322.
- SPENCE C, ROUSE W R, WORTH D, & OSWALD C.,2003. Energy Budget Processes of a Small Northern Lake. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 4, No. 4, p. 694-701.
- STEEDMAN R J, FRANCE Robert L, KUSHNERIUK R S, & PETERS R H.,1998. Effects of riparian deforestation on littoral water temperatures in small Boreal forest lakes. *Boreal Environment Research*, Vol. 3, p. 161-169.
- STRALHER A N.,1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions american Geophysical Union*, Vol. 38, No. 6, p. 913-920.
- TAKAMURA N.,2012. Status of Biodiversity Loss in Lakes and Ponds in Japan. In S. Nakano, T. Yahara, & T. Nakashizuka ,Éd., *The Biodiversity Observation Network in the Asia-Pacific Region: Toward Further Development of Monitoring*, Tokyo, Springer Japan, p. 133-148..
- TASSIN B.,1986, décembre 22. « Contribution à la modélisation écologique du lac Léman : modèles physiques et biogéochimiques du lac » Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 464 p.
- TERASMAA J, & PUNNING J-M.,2006. Sedimentation dynamics in a small dimictic lake in northern Estonia. *Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol.*, Vol. 55, No. 3, p. 228-242.
- THIENEMANN A.,1925. Der See. In *Die Binnengewässer Mitteleuropas* ,p. 84-211.
- THOMPSON R, & IMBERGER J.,1980. Response of a numerical model of a stratified lake to a wind stress. In *Proc. 2nd Int. Symp. Stratified Fows* ,Vol. 1, p. 562-570.
- TISSOT L, & SOUCHON Y.,2011. Synthèse des tolérances thermiques des principales espèces de poissons des rivières et fleuves de plaine de l'ouest européen. *Hydroécologie Appliquée*, Vol. 17, p. 17-76.
- TOFFOLON M, PICCOLROAZ S, MAJONE B, SOJA A-M, PEETERS F, SCHMID M, & WÜEST A.,2014. Prediction of surface temperature in lakes with different morphology using air temperature. *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 59, p. 2185-2202.
- TOUCHART L.,2001. « De la température de l'eau à la géographie des lacs » ,Thèse d'HDR en géographie. Université de Limoges, Limoges, 480 p.
- TOUCHART L.,2002. *Limnologie physique et dynamique* ,Harmattan. Paris, 396 p.
- TOUCHART L ,Éd.,2007. *Géographie de l'étang: des théories globales aux pratiques locales*. Paris, L'Harmattan, 228 p.
- TOUCHART L.,2016. Le bilan thermique des étangs: réflexion épistémologique et application

aux étangs limousins. *Annales de Géographie*, p. 27.

TOUCHART L, AZAROUA A, MILLOT C, & TURCZI V.,2012. Les risques d'érosion sur les rives des étangs, le cas du démaigrissement des plages. *riscuri si catastrofe*, Vol. X1, No. 11, p. 21-36.

TOUCHART L, AZAROUA A, NEDJAI R, ALDOMANY M, & MILLOT C.,2014. The stability of the water column in french ponds ,Limousin region by the calculation of the Wedderburn number., Cluj University Press, p. 8-15.

TOUCHART L, & BARTOUT P.,2010. The influence of monk equipped ponds on the quality of basin head streams, the example of water temperature in Lumousin and Berry ,France. *Lakes, reservoirs and ponds*, Vol. 4, No. 2, p. 91-108.

TOUCHART L, & BARTOUT P.,2011. LA GESTION DU RISQUE THERMIQUE EN ÉTANG :LE CAS DE LA DÉRIVATION. *RISCURI ÎI CATASTROFE*, Vol. 9, No. 1, p. 149-161.

TOUCHART L, & BARTOUT P.,2012. Thermoclines in ponds: a new typology by the study of continuous water temperature measurements. Présenté à Water resources and wetlands, Tulcea-Romania, ,p. 27-32.

TOUCHART L, & BARTOUT P.,2015. Quel est le volume d'eau contenu dans les étangs limousins et français ? *Physio-Géo. Géographie, physique, et environnement*, No. Volume 9, p. 111-123.

TOUCHART L, & BARTOUT P.,2018. Le limnosystème est-il un concept géographique ? *Annales de Géographie*, Vol. 719, p. 29-58.

TOUCHART L, BARTOUT P, & AZAROUA A.,2012. The influence of ponds on dissolved oxygen in small rivers of Berry ,France. In *Air and water components of the environment*, . Cluj-Napoca, Presa Universitar, p. 17-24.

TOUCHART L, & BOUNY J.,2008. Phytoplankton geographic spatialization in two ponds in Limousin ,France. *Applied Geography*, Vol. 28, No. 4, p. 295-310.

TOUCHART L, & GRAFFOILLÈRE M.,2004. *Les étangs limousins en questions* ,Editions de l'AIGLE. Limoges, 188 p.

TOUCHART L, MILLOT C, MALEVAL V, KOFF T, KAPANEN G, TERASMAA J, ... AZAROUA A.,2013. Le risque de dégradation de la qualité de l'eau des lacs de la réserve naturelle de Kurtna ,Estonie: le cas de la température et de l'oxygène dissous, Vol. 13, No. 2, p. 49-62.

TRINTIGNAC P, BOUIN N, & KERLEO V.,2005. « Guide de bonnes pratiques pour la gestion piscicole des étangs » ,Guide. Pays de la Loire: SMIDAP, 31 p.

- TROTIGNON J.,2000. *Des étangs pour la vie: améliorer la gestion des étangs* ,Nouvelle éd., mars 2000. Montpellier, L'Atelier technique des espaces naturels, 70 p.
- TRUESDALE G A, DOWNING A L, & LOWDEN G F.,1955. The solubility of oxygen in pure water and sea-water, Vol. 5, No. 2, p. 53–62.
- TURNER J S.,1973. Buoyancy Effects in fluids. *Cambridge Univ. Press*.
- VAINU M, & TERASMAA J.,2016. The consequences of increased groundwater abstraction for groundwater dependent closed-basin lakes in glacial terrain. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 75, No. 2, p. 75-92
- VÄISÄLÄ V.,1925. Über die Wirkung der Windschwankungen auf die Pilotbeobachtungen. *Phys-Math*, Vol. 2, No. 19, p. 19-37.
- VALADAS B.,1984. « Les hautes terres du massif Central français » ,Thèse d'Etat en géographie. Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Paris, 927 p.
- VANNOTE R L, MINSHALL G W, CUMMINS K W, SEDELL J R, & CUSHING C E.,1980. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 37, p. 130-137.
- VERPOORTER C, KUTSER T, SEEKELL D A, & TRANVIK L J.,2014. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. *Geophysical Research Letters*, Vol. 41, No. 18, p. 2014GL060641.
- VINÇON-LEITE B, TASSIN B, & JAQUET J-M.,1995. Contribution of mathematical modeling to lake ecosystem understanding: Lake Bourget ,Savoy, France. *Hydrobiologia*, Vol. 300-301, No. 1, p. 433-442.
- VINÇON-LEITE B, ZERVOS N, & TASSIN B.,2012. Les proliférations de cyanobactéries dans les lacs et réservoirs: modélisation prédictive dans un système d'alerte. In *16 èmes journées scientifiques de l'environnement-Eau: vivre sans risques*. Créteil, p. 3-14.
- VIVIER P.,1939. Rapport sur le régime de la température des lacs français. *Association internationale d'hydrologie scientifique*, Vol. 1.
- WANG W, XIAO W, CAO C, GAO Z, HU Z, LIU S, ... LEE X.,2014. Temporal and spatial variations in radiation and energy balance across a large freshwater lake in China. *Journal of Hydrology*, Vol. 511, p. 811-824.
- WANG Y, POLITANO M, & LAUGHERY R.,2013. Towards full predictions of temperature dynamics in MacNary dam forebay using OpenFOAM. *WATER Science and engineering*, Vol. 6, No. 3, p. 317-330.
- WARD James V., & STANFORD J A.,1987. The Ecology of Regulated Streams: Past Accomplishments and Directions for Future Research. In J. F. Craig & J. B. Kemper ,Éd., 389

- Regulated Streams: Advances in Ecology*, Boston, MA, Springer US, p. 391-409.
- WARD J.V.,1985. Thermal characteristics of running waters. *Hydrobiologia*, No. 125, p. 31-46.
- WARD J.V.,s. d.. A temperature-stressed stream ecosystem below a hypolimnetic release mountain reservoir. *Archiv für Hydrobiologie*, Vol. 74, No. 2, p. 224-275.
- WASSON J-G, CHANDESRIS A, PELLA H, & BLANC L.,2004. Les hydro-écorégions: une approche fonctionnelle de la typologie des rivières pour la Directive cadre européenne sur l'eau. *Ingénieries*, Vol. 40, p. 3-10.
- WAWRZYNIAK V.,2012, décembre 12. « Etude multi-échelle de la température de surface des cours d'eau par imagerie thermique : exemples dans le bassin de Rhône ». Université Jean Moulin Lyon 3, Lyon, 171 p.
- WAWRZYNIAK V, ALLEMAND P, BAILLY S, LEJOT J, & PIÉGAY H.,2017. Coupling LiDAR and thermal imagery to model the effects of riparian vegetation shade and groundwater inputs on summer river temperature. *Science of The Total Environment*, Vol. 592, p. 616-626.
- WAWRZYNIAK V, PIÉGAY H, ALLEMAND P, VAUDOR L, GOMA R, & GRANDJEAN P.,2016. Effects of geomorphology and groundwater level on the spatio-temporal variability of riverine cold water patches assessed using thermal infrared ,TIR remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 175, p. 337-348.
- WEBB B W, & WALLING D E.,1986. Spatial variation of water temperature characteristics and behaviour in a Devon river system. *Freshwater Biology*, Vol. 16, p. 568-608.
- WEBB B W, & WALLING D E.,1988. Modification of temperature behaviour through regulation of a british river system. *Regulated rivers: research and management*, Vol. 2, p. 103-116.
- WEDDERBURN E M.,1910. Temperature of Scottish lakes. *Bathymetrical Survey of the Fresh-Water Lochs of Scotland, 1897-1909*, Vol. I, p. 91-144.
- WEINBERGER S, & VETTER M.,2012. Using the hydrodynamic model DYRESM based on results of a regional climate model to estimate water temperature changes at Lake Ammersee. *Ecological Modelling*, Vol. 244, p. 38-48.
- WETZEL R G.,1983. *Limnology*, Second edition. Michigan State University, Saunders college publishing, 767 p.
- WETZEL R G, & LIKENS G E.,2010. *Limnological analyses*, Third. New York, Springer Science & Business Media, 429 p.
- WILHEM F.,1960. Seen als geographisches Forschungsobjekt. *Berichte zur deutschen Landeskunde*, Vol. 25, No. 2, p. 305-321.
- WILLIAMS O O.,1968. Reservoir effect on downstream water temperatures in the upper

Delaware river basin. *United States Geological Survey professional Paper*, Vol. 600, p. 195-199.

WILLIAMS P, WHITFIELD M, BIGGS J, BRAY S, FOX G, NICOLET P, & SEAR D.,2003.

Comparative biodiversity of rivers, streams, ditches and ponds in an agricultural landscape in Southern England. *Biological Conservation*, Vol. 115, No. 2, p. 329-341.

WINSLOW L A, WOOLWAY R, BRENTRUP J, LEACH T, ZWART J, ALBERS S, & COLLINGE D.,2018. Lake physics tools.

WISZNIEWSKI J.,1953. Uwagi w sprawie typologii jezior Polskich. *Polskie Archiwum Hydrobiologii*, Vol. 1, No. 14, p. 11-23.

XING Z, FONG D A, TAN K M, LO E Y-M, & MONISMITH S G.,2012. Water and heat budgets of a shallow tropical reservoir. *Water Resources Research*, Vol. 48, No. 6.

doi:[10.1029/2011WR011314](https://doi.org/10.1029/2011WR011314)

YIN C, & SHAN B.,2001. Multipond Systems: A Sustainable Way to Control Diffuse Phosphorus Pollution. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, Vol. 30, No. 6, p. 369-375, septembre.

ZHANG Y, WU Z, LIU M, HE J, SHI K, ZHOU Y, ... LIU X.,2015. Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir ,Lake Qiandaohu, China. *Water Research*, Vol. 75, p. 249-258.

ANNEXE

Annexe 1 : Résumé long en anglaise

Extended abstract

Introduction

In the upper Limousin basin of the Dordogne in central part of France, the pond of la Ramade, several years ago, was considered responsible for the warming of the Bort-les-Orgues reservoir. In the upper Moselle basin of the Rhine, in north-east France, the budget earmarked for the construction of a diversion bypassing the Baerenthal pond has increased steadily to reach more than one million euros in 2018. In the hydrographic network of small ice kettle lakes in the Estonian part of the Narva basin, the water quality monitoring is disrupted by curious anomalies.

These three European examples have in common that they concern very small bodies of water at the head of a basin, with fragile or at least easily disturbed stratification, and lateral entrances, by streams or aquifers, of great importance in proportion to the size of the water body. Ponds can create problems that can only be solved by a precise study of the water bodies, the main discriminating factor being temperature. In one case, it is necessary to change the scale and compare the calorific volume of a pond with that of a large reservoir. In another case, the heat content of the pond must be distinguished from that of the bypass watercourse. In another, finally, it is essential to understand how the water from the groundwater is inserted, in a more or less abnormal way through the bodies of water of the small kettle hole lake.

It is unreasonable to develop the territories of basin heads if we accept the first assumption that the pond corresponds to the epilimnion and coastal zone of a lake (Loup, 1974), and the second, measuring temperature without taking into account the volume.

The consideration of such a theoretical impact of the pond lies in a lack of knowledge of the functioning of this environment, often considered as a homogeneous environment or, on the contrary, integrated with large reservoirs (Carluer et al., 2012). The thermal heterogeneity of the pond has rarely been taken into account and has often been reduced, without its vertical component, to the epilimnic or coastal part of the lake. The main idea still lies in the mixing nature of the ponds water column. The limnogeographical school of thoughts contradicts this hypothesis and has demonstrated temperature heterogeneities in the verticality of ponds (Touchart, 2001, 2007, Folkard et al., 2007), while its horizontal heterogeneity remains poorly studied. The horizontal heterogeneity of temperature attracts little attention from limnologists (Wedderburn, 1910, Milon, 1929, Melin,

1939, Abbasi et al., 2016, Soullignac, 2017) due to the low presence of geographers in limnology since the mid-20th century. Concerning the ponds, the approach is almost non-existent, as the environment is considered as spatially homothermic, except in its coastal zone in relation to the vegetation that develops there (Brunaud, 2007, Coates and Folkard, 2009).

The pond system is complex and particular since it requires hot water to increase productivity when it is used for fish farming while, at the same time, environmental guidelines and regulations require fresh water at the outlet of the lentic environment to promote the development and life of salmonid fish species in the downstream. This inconsistency puts the ponds at the heart of a conflict of use and regulations, in which the owner must ensure management to limit the risk of downstream thermal pollution. Faced with this dilemma, is it possible to limit the downstream thermal influence while preserving a significant amount of heat inside the water body? This question requires an analysis of heat capacities within the water body not only on a vertical scale, but also on a horizontal scale, taking into account the water body as a whole.

The spatial variations at vertical and horizontal scales leads to the vision of the pond as a body of water and its calorific capacity in thermal analysis, considered as the multiplication of the volume of water by temperature (Forel, 1892, Hutchinson, 1957). The heat content monitoring of water bodies, their hourly evolution and exchanges with other hydrological components on the surface or groundwater, provides a new methodology. The analysis of limnocentric exchanges which places the water body at the heart of the exchanges, allows to overcome the problems of studies that consider the lentic environment as a black box. Calorific analysis distinguishes water masses between ponds and streams, but also within the pond.

The differentiation of water masses within a pond should be studied and mapped. The study of ponds makes it possible to analyze a human-sized body of water in which both vertical and horizontal components can be varied while encompassing the entire body of water with sufficient accuracy. This is possible thanks to their small area and depth. Their discontinuous polymictic behavior (Lewis, 1983) determines a quick thermal functioning (Dussart, 1966) which requires monitoring at precise spatial and temporal resolutions. The analysis of the calorific capacity of the different water bodies allows a typology of the ponds according to their morphology and climatic conditions.

The existence of differentiated water masses within a pond can be quantified analytically by studying vertical, horizontal and temporal variations. For a synthetic analysis of the heat exchanges between the water body and the air, as well as within the water body in the vertical and horizontal components, are lake indicators sufficient and applicable to ponds? Does the analysis of the heat balance and stability allow the understanding of spatial temperature exchanges, particularly in its

zonation? As all the parameters are based on an analysis in the vertical dimension only, it seems necessary to provide a new integrating indicator of spatial zoning by considering the water mass in three dimensions and its evolution over time.

Hypothesis:

The main working hypothesis is the presence of a thermal heterogeneity of a pond in three dimensions. It involves a structuration of water masses, due to differences in density, and therefore temperature, combining vertical stratification and horizontal zonation, certainly on shorter time scales than in lakes, but nevertheless sufficient to characterize the internal functioning of the pond. The second hypothesis, inserted in the first one, presupposes that the efficiency of the water outlet system (weir, monk, valve, etc.) depends on its location in relation to the water masses previously mentioned and their spatio-temporal evolution (above or below the thermocline, in the basin where the warmest waters are pushed by the wind and thickened, or on the contrary driven out and replaced by cold rises, etc.).

Objectives:

The main originality of this thesis is the question of water masses inside the pond according to a geography approach, which is based on the four dimensions of the hydrosystem (Roux, 1982, Amoros and Petts, 1993), and limnology to consider the water body, as a limnosystem, as a driver of the hydrographic network (Touchart and Bartout, 2018). As part of the thesis, modest management proposals will be developed in an attempt to improve the quality and temperature monitoring.

1) Studying the heat budget of ponds as a particular operating model

The heat budget of lakes has been widely studied for decades, while its evolution remains poorly known for ponds. The heat budget of ponds has its own functioning that differs from the lakes', due to their shallow depth and surface area. The purpose is to analyze and quantify the evolution of the calorific capacity of three ponds over several years. Finally, in a requirement to know the heat content of small water bodies on a regional scale, attempts will be made to extrapolate from a few water bodies on a bigger scale.

2) Developing an indicator to measure and quantify the spatial variation of the heat content

There are a multitude of indicators of spatial variation in temperature with depth. On the other hand, no indicator highlights horizontal variations in temperature or the ability of the water body to develop this spatial heterogeneity. We propose a new indicator that can meet the spatial knowledge needs of

temperature and thermal structure, taking into account the heat content of the water body and therefore its volume and temperature. This indicator is a tool for global understanding but also a contribution to the management of the water body and the thermal risk for the downstream environment.

3) Understanding the spatial heterogeneity of water masses according to pond types

Depending on the surface area, morphology and environmental factors, water bodies may experience spatial variations in their physico-chemical parameters. The objective here is to analyze and quantify this variation over three ponds: a great pond, a small one with a localized shading effect, and a third one with short water retention time, in which the stream can have an effect on temperature distribution. The analyses are completed on three lakes located in Estonia, two of which are influenced by underground inputs and one by the creation of a channel. The main assumptions are the dissociation of water masses with basins that can operate autonomously from the central part for multilobe water bodies and the existence of possible spatial variation in temperature caused by local environmental factors even on the smallest ponds.

4) Proposing tools based on the spatial variation of physico-chemical parameters in order to improve pond management and limit the thermal risk in the downstream environment

Geography also allows us to provide some thoughts on the management possibilities that result from the analyses of the ponds. Most analyses and management proposals focus on the vertical aspect of the water body, the depth of the water column. Issues of water outlet depth are the most discussed and, they will be discussed here. However, in addition, management hypotheses will be formulated, based on the interpretation of spatial variation that can bring novelty and thus limit the downstream thermal influence thanks to the so-called soft methods.

Structure of the thesis

The first part of the study will focus on the work carried out on the ponds. The main difficulty is to define and delimit these spaces at the interface between lake and pond, and water body and watercourse. Due to their small size and shallow depth, these environments have been little studied but are at the heart of a complex physical and social context. The ponds will be approached through the eyes of a physicist geographer, placing the water body at the heart of climatic, hydrological and

calorific exchanges, but focusing on the surrounding issues. Aspects of biology through the fish farming approach, plankton displacement or lethal temperatures will be addressed. Finally, the study of ponds is undeniably geographical since the physical aspects are mixed with the social needs at the source of the creation of the environment, and whose services make it possible to ensure leisure, hydrological need for agricultural purposes or even economic return. Social issues must be addressed when studying these anthropogenic environments. The study sites will also be highlighted according to their choice of location, from the western edge of the Massif Central to the extreme west of the Russian plate, through the sandstone plateau of the Northern Vosges, different sectors will be compared. Each is representative of a type of water body or a region of ponds.

The second part examines the methodological issues that arise for the study, from the material used to consider the development of traditional lake indicators to the analysis of a model of the thermal balance of ponds. The first chapter is methodological, while the second chapter is dedicated to the results and analyses resulting from them. Measurements of more than one million continuous thermal data give us the results on the heat balance and temporal variation of three French ponds and two Estonian lakes. The evolution of the thermal balance of the ponds will be analyzed according to their morphological characteristics, particularly in relation to the mean depth. It will also be analyzed as that of a pond model combining knowledge on shallow and deep ponds in order to characterize the behavior of ponds as a whole.

The third part deals with the thermal geography of water bodies. Can the geographical study of water bodies through spatial temperature variation lead to a better knowledge of these environments? To what extent or under what conditions are ponds capable of creating thermal heterogeneity? The horizontal component has been left out in limnological science and will be widely studied here, through the variation of different factors of this heterogeneity such as the presence of tributaries, wind strength or even underground exchanges. Heat exchanges are first analyzed in Chapter 5, between the stream and the pond, while the Chapter 6 focuses on internal exchanges within the water body.

Finally, we will try, based on our own results, to bring additional elements to the study and measurement of the spatial variation of the calorific content by creating a new indicator: the heat center. This new indicator no longer meets the knowledge needs of the water column but of the entire water body. Pond management elements will also be proposed in this last part, in relation to the knowledge of spatial temperature variations and the new heat center. The choice of type of water outlet or the implementation of soft methods such as pavement shading will be discussed. While the question of whether ponds require management no longer arises, it is questionable whether the

spatial dimension provides management solutions. Is it the solution to reduce the thermal risk in the downstream? The development of the new indicator, the heat center, can provide solutions both in terms of understanding the environment and in terms of management.

I. The contribution of heat budget and limnological research in the current regulatory and geographical contexts concerning ponds

The heat budget was invented by Forel (1892) and represents all the internal and external factors which bring or remove calories on the lake (Fig.2). It is somewhat theoretical for lakes, but becomes real for ponds because of their anthropogenic morphology, since they can discharge all their calories into the downstream. The study of the ponds offers a new and more applied perspective of the heat balance by taking into account the temperature zonation, which can be more easily measured thanks to its laboratory size (Dussart, 1966) compared to great lakes. Due to their location on rivers, generally at the headwater, ponds are at the heart of current environmental problems. Their negative effects on the stream are pointed out, as they are considered *de facto* disruptive. The knowledge of their internal functioning is necessary to understand their negative impact but also their beneficial effect. However, in a limnological geographical approach, the water body must be located at the center of the system, and not as the only source or receptacle of pollution.

This first part showed the full value of the use of the heat budget of water bodies, according to a geographical approach, which, on the one hand, allows to add the horizontal zoning of temperatures to their vertical scales, and, on the other hand, takes into account the entire range of size and origin of water bodies through changes in scale and without neglecting either the smallest of them or those of artificial origin. The development of a heat budget adapted to ponds offers the possibility of blocking the small size variable and extending the method to small bodies of water of natural origin. One of the main differences is that the ponds, which were built with a generally watertight bottom, do not usually have a hydrological and calorific exchange with groundwater, thus in addition to our three main French study sites, we examined small Estonian kettle hole lakes groundwater dependent.

The first pond, named La Ramade, is a great pond of 62 ha, located in high plateau of Millevaches (790 m high) with a maximal depth of 3 m (Fig. 11, 13). A second pond was added, named Rilhac, located in a cropped watershed in Limousin region (Fig. 14). This one is a very small pond (0,4 ha) but a deep one (4.2 m of maximum depth), with a round shape. In contrast to the first pond, Rilhac limits the lower part of the ponds. The third pond, Baerenthal, is located in the northeastern part of France, with an area of 11 ha and a maximum depth of 2.5 m (Fig.16). The study of the three ponds is

completed by natural lakes located in Estonia, with shape and morphology closed to ponds, and with artificial pressures disrupting global lake behavior (Fig. 19). Lake Martiska has been used for studying the links between lakes and groundwater (Fig. 20) while lake Nõmme is disturbed since the creation of a channel crossing the lake from the mines (Fig. 21).

Beyond the demonstrated and contextualized interests in the use of heat budget and all the possibilities it offers, the first part also highlighted the limits of this tool. This raises the question of the possible need to create other indicators.

II. The pond heat budget, methods and analysis

The heat budget methodology is based on an integration of lake volume in complement to temperature measurements. Water temperature and lake volume give the heat content (Fig. 22). Developed by Forel (1892), the heat budget is a synthetic information about all the external and internal factors bringing or removing calories on lakes. The main calorific input is from atmospheric conditions, with short and long-wave radiations and air temperature, while the main loss comes from evaporation. In small and shallow lakes, the secondary factors are more important. The groundwater inflow, tributaries and emissary, and sediment heat may have an important role in ponds or shallow lakes heat budget. More than the heat budget variations, the secondary inputs may generate spatial variations in water temperature.

According to the study of three ponds a model of the pond heat content evolution has been developed in order to dissociate ponds from lakes. Pond's stratification occurs in the beginning of the spring, with short and weak stratifications (Fig. 38). During the summer, the stratification is stronger, with temperature differences between the surface and the bottom up to 14°C, and this situation lasts from days to months for the deepest ones. Every 10 days (more or less according to the location, the pond depth), an atmospheric depression breaks the stratification for a few days until a new stratification appears (Fig. 38). Because of this polymicticity, the accumulated surface heat sinks to the bottom layers (Fig. 40). The alternation of this summer mixing increases the heat content (Fig. 37) and brings oxygen to the deepest layers (Fig. 41). This particularity induces a high heat budget of the ponds compared to their small size and depth. The heat budget can reach 4 000 cal/cm² but is still less important than deeper lakes.

Even in shallow waterbodies we can dissociate the shallow ponds and the deep ones referring to their maximum depth or their relative depth. Between deep and shallow ponds, the heat content dynamic differs. The shallow ones, less than 2 to 3 m of maximum depth, have a quick alternation of

stratification and mixing during summer, every 5 to 15 days (Fig 44). Their weak stratification can be quickly shattered when the atmospheric conditions are favorable to a mixing. The deep ponds can develop a strong stratification up to several months for the deepest ones (Fig 47). The deep layers are totally isolated from the surface during stratification. The dynamic is closer than the one observed on lakes, with anoxic conditions in the bottom due to a strong and long stratification. The elaboration of a pond model makes it possible to highlight the global thermic evolution of these small water bodies, different from lakes, and whose variation in depth, even slight, leads to differences in behavior.

A new equation of heat budget from the mean depth, as it has been done on great lakes by Gorham (1964) and Allot (1986) and following the first equation on ponds by Touchart (2016) can be propose. With data from 7 ponds and 4 shallow lakes (Tab 7), we set up an equation which functions on small and shallow water bodies, with a mean error of 4.85%. According to this equation, it is now possible to have an overview of small waterbodies heat content around a specific area. The extrapolation has been made in the Limousin region and the main watersheds in this area (Fig. 52). This first draft gives some results about the main rivers exposed to thermic risk from ponds. The second main result is a total heat content of the Limousin region, one of the main pond areas in France, of about $2,9^{E15}$ to $3,4^{E15}$ calories per year. To compare with great lakes, this result represents 80% of the Bort les Orgues reservoir, one of the greatest reservoirs in France and located in the same region, with an area of 10% of the total ponds area.

III. Geographic approach of water bodies temperature based on vertical and horizontal variations

The heat-release from ponds to downstream is currently one of the main environmental issues in France. Usually the ponds are only studied with upstream and downstream measurements, the particularity of this thesis is to, on a first hand, analyze the internal thermal behavior of the pond to understand the downstream impact, and on a second hand, to use the calorific approach, with flow/volume and temperature, to specify the heat exchanges.

Polymictic water masses, as ponds, can be stratified from days to weeks during summer. According to this particularity, ponds will modify the heat dynamic of the stream from which they are build. The knowledge of the pond intern dynamic is important to understand and evaluate the possible effects downstream. These effects depend on the water body volume, the outflow depth and management and the position in the watershed, especially for cascade effects (Tab. 10). The maximum warming of the stream due to the pond of Baerenthal is 6.5°C , while the annual mean warming is around 1.3°C

(Tab 8). The outflow depth is of great importance: a surface-outflow pond has the highest warming effect on downstream river, but keep a similar temperature dynamic as the river (Fig 58). A deep-outflow can limit the warming effect of the pond but release a water without the same dynamic, especially on daily amplitude (Fig 59). In addition, a deep-water release can deteriorate the downstream oxygen conditions during a stratification. Temperature is the factor propagating farthest (Williams, 1968). In that sense, it is a very good indicator to measure the maximum distance influenced by a perturbation as a damming waterbody. On the Baerenthal Pond, 6 sensors have been set up downstream, with the farthest sensor at a distance of approximately 7 km (Fig 55). The pond has a mean annual influence distance of around 2.5 km. The first 2.5 km territory is the mean impacted in terms of temperature value and time. During summer, this mean influence territory is going further, with a distance of 5.8 km. A third downstream territory, named exceptional influenced zone, is located at 9 km from the pond and correspond to the maximal distance rarely influenced by Baerenthal pond (Fig 56).

It is really necessary to study the warming effects of ponds. This effect depends also on the pond volume/stream flow ratio, named retention time. The more the ratio is important, the more the pond influence on the downstream is important (Anquetil, 2018). The study of the inflow/ outflow, the volume and the temperature combined leads to the heat content. The headwater of Zinsel du Nord river heat content has been analyzed, according to the thermal sensors located on every stream and along the main river, and intermittent flow measurements. The results show a high difference between small streams and the main river concerning the heat content (Fig 61), due to highest temperature on the main river, but also to a more important flow (Fig 62). The two complexes of ponds, one located on Mouterhouse village, the other on Baerenthal, are the main drivers of big heat content on river (Fig. 115). On a cumulative effect study, the most important factor influencing heat content outflow is the volume of the pond. The smallest and shallowest ponds have a less influence than great ponds (Tab. 10). The influence on heat budget is highly different between small ponds in first or second order streams than great ponds in main river. However, the heat content approach gives some clues on positive influence of ponds regarding the dry issues. Some ponds are providing water even in dry period, with deep withdrawal, while the rest of the stream without ponds are dry. Using heat content is an interesting way to define if installing a derivation is suitable according to the flow and the temperature effect (Fig 63). Sometimes it occurs than a derivation is not well calibrated and can be dry during summer, so without any favorable influence during the most important time, or even costing a lot for no suitable results (Millot, 2015).

The main particularity of this thesis is on the study of temperature spatial variation at the vertical, as it is ordinary done, but also at the horizontal scale. This 3D overview of temperature characterize the

heat exchanges inside a small and shallow waterbody and which factors can have an effect on the heat distribution. The study is focused on the wind effect on great ponds, the shadow effect on a very small pond and the hydrology effect on on-river ponds and groundwater dependent lakes. The hypothesis is that these factors can have an outcome on the water body 3D variation of temperature. Thermal buoyancy chains have been installed in several locations of the ponds, with thermistors every 25cm depth.

The greatest pond, La Ramade, has a particular morphology, with two shallow basins, at the North and the West separated from main water volume by two narrow channels (Fig 65). The wind effect can be important (Fig 64), with a maximum temperature difference of 11°C measured between the north and south parts, separated from less than 1.5km. This spatial variation of temperature is due to wind effect and can be strong from days to weeks according to wind intensity and direction. The wind effect obtains a various impact under a stratified or mixed pond. If the pond is homothermic, the effect will reach the totality of the water column (Fig. 72) but can be located on some places. In a stratified condition, the depth impacted depend on the wind intensity (Fig 70, 71). If the wind is weak, only the surface temperature can be affected. When the wind increases, it reaches deepest part up to the possible mixing of the water column. In this second condition, the effect generally occurs with the downwelling of the warm surface water at the windward coast while an upwelling of the colder water occurs at the lee side (Fig.70, 71,72).

Rilhac pond is a small (0.4 ha) and deep pond (maximum depth of 4.2 m) with a forested-hill on its south-west bank. Because of the location of this forested-hill, while the rest of the pond is free of vegetation, we fitted 3 thermal chains, one at the deepest part, one at the shallow part and the third one located at the same depth than the second one, but in the sunny part of the pond (Fig 67). Considering the mean annual temperature, the three means are really close, with only 0.1°C gap between the sunny and shadow parts. Some variations happen in the maximum temperature, reaching more than 30°C anywhere except in the shadow part. But the main difference occurs during the sunny days in late spring to mid-autumn, where the shadow part is 2 to 3°C cooler than the rest of the pond (Fig 74, 75, 76). The temperature gap between the shadow and sunny parts occurs regularly with cloudless days and is broken by night cooling. The temperature gap can be high even for this very small pond, but, in contrast to the wind factor, it only affects the surface temperature. At 50 cm depth, the variation is not felt anymore and the thermal profiles are similar, except on surface temperature (Fig 77). The thermocline oscillation between the shadow and sunny parts of the pond cause density currents (Fig 78). These currents are similar than those on lakes or great ponds, so called seiche, even in this very small pond. They are not due to external forces, as wind, but probably from thermal differences inside the water body.

The limnocentric vision makes it possible to measure the effect of the arrival of water from a tributary into a pond and to know if it can impact the thermal structure of the water body, and if so, to which extent? Measurements on Baerenthal Pond show existing but reduced temperature differences between the tail and the rest of the pond. Only the western part, forming a small basin at the tributary level, seems to be influenced (Fig 81, 82). The inflows appear to only disrupt the area of the pond directly under the effect of the watercourse and not the entire water body. The thermal influence zone of the inflow of a canal in Lake Nõmme, Estonia, is limited at the first few meters around the tributary. Conductivity measurements highlight a greater area of influence of the watercourse from a chemical point of view, with the separation of the lake into two parts, east and west, and the visibility of the channel inside the pond (Fig 83). A small inflow, at the middle part of the lake, seems to mix the lake water in a chemical point of view and reduce the high conductivity.

These localized effects were also measured on groundwater-dependent lakes, in Estonia. In winter and in autumnal mixing, the heat exchanges between the lake and the groundwater are perceptible within the water mass. Lake Martiska is divided into several water masses, with an area strongly influenced by the arrival of groundwater to the south and a slightly influenced area to the north. These two zones are separated by a shallow homothermic plateau (Fig 85). In autumn, we find a similar thermal structure with only the south area in inverse stratification due to the arrival of groundwater above 4°C, while the rest of the lake is mixed in every location (Fig 86). This dissociation was also measured on the closed lake Kuradi, with the only deep central part in inverse stratification during autumn mixing (Fig 87).

IV. The contribution of spatial analysis and heat balance in the study of heat exchanges and in the thermal management of water bodies

Strong thermal heterogeneities can exist within ponds, from the largest to the smallest ones. These heterogeneities were observed on the three ponds studied and on the three Estonian lakes. However, current limnological indicators do not allow the measurement and quantification of three-dimensional temperature variations. Therefore, it seemed appropriate to develop and test a new indicator, the heat center, in order to map and quantify isotherms within a water body. According to the center of gravity developed by Smith (1928) the heat center methodology is based on the heat budget and the thermocline depth on several locations of the lake.

The analysis of the thermal center first allows to map and quantify the spatial variation of temperature. Secondly, it is a management tool for these environments.

Its calculation is based on Smith (1923) and Dussart (1992) calculations of the center of gravity of a lake and fill a need for spatial knowledge which is difficult to observe by the heat budget (Fig 88, 89). The thermal center is an integrator of the external and internal forcing of the water masses characterized by spatial variations in temperature and thermal structure (Fig 91). Depending on the size, external factors and environments, the depth and location of the pond, the evolution of the thermal center will be more or less important. In this thesis, we studied the evolution of this new indicator on three ponds with various morphologies.

On the three ponds studied, the thermal center movement is most pronounced on the smallest pond, Rilhac. According to the opposition of the sunny and shaded areas, the thermal center moves towards the sunny area during the hot period, from May to September (Fig 93). The heat is distributed in the sunny area as well as to the shallowest part of the pond. On the large Ramade pond, the displacement of the thermal center is important and largely dominated by external factors such as the wind (Fig 95) but also by the internal structure of the water mass. During the mixing, the thermal center moves towards the deep areas, while it is oriented towards the shallow areas during thermal stratifications (Fig 94). Due to the lengthening of the water body in the north-south direction, the dominant displacements of the thermal center are latitudinal for this pond. The thermal center of the third pond, Baerenthal Pond, has a different evolution, mainly impacted by the presence of a tributary. Its action has a major effect mainly in winter, when part of the pond, near the dam, is ice-covered while the west part of the pond is not, mainly because of the turbulence caused by the entrance to the tributary (Photo 12). At this time, the thermal center is oriented towards the east and the dam, as the inverse stratification allows to store calories at the bottom while the western part is in mixing close to 0°C.

The morphology of the pond is taken into account in the heat diffusion and its quantification by the thermal center. However, external factors and the surrounding environment are the main drivers of thermal heterogeneity, such as the small pond of Rilhac, which benefits from a strong heterogeneity despite its small size. The creation of the thermal center allows the quantification of this spatial heterogeneity, in three dimensions, of the ponds and lakes water masses.

From a management perspective, the thermal center can be an asset for the conservation of aquatic environments and limit the risk of heat diffusion downstream. For ponds with bottom or mixed water outlets, such as the Ramade pond, when the thermal center is located towards the dam, the warming of the pond is maximum (Fig 99). Knowing the position of the thermal center by using meteorological conditions (Fig 98) makes it possible to anticipate this risk by knowing the thermal response of the pond to external forcing (Fig 100).

In a broader management sense, three-dimensional analysis of the water masses temperature within the pond provides a better understanding of these waterbodies' behavior. The heat distribution of the pond is not homogeneous. Taking into account averages from data at several locations and depths of the pond provides a volume overview of the temperature. In order to understand the environment for the development of fish species, the average temperature of the ponds remains low and rarely exceeds 25°C for the entire body of stagnant water. During the summer, it is between 20 and 25°C overall, within the critical threshold of trout (*Salmo Trutta*), for example (Fig 102).

The spatial heterogeneity of temperature, even for smallest waterbodies, calls into question the representativeness of the measurements made at a single point. Especially for ponds and reservoirs, where the deepest point is close to the dam, far from the geometric center. Depending on the weather conditions or the pond morphology, the deepest zone represents only a small part of the pond area and may have a distinct behavior from the rest of the water body (Fig 105). In this case, and more particularly during the summer period, it is preferable to make several measurements at different points in the pond in order to have an overview of the physical and chemical conditions of the whole water body. The use of continuous data for polymictic media remains the best solution, if possible at several points.

Finally, the complete thermal analysis of ponds and lakes in this thesis brings us back to the question of the dissociation of these environments. The study of the heat budget confirms the dissociation of these water bodies using the average depth. The lake-pond boundary is between 2 and 2.5 m in average depth. To go further, ponds (0.7 to 1.5m of average depth), pond-lakes or lake-ponds can be separated according to their natural or artificial origin (1.6 to 3m of average depth) and lakes above three meters (Fig 106). The surface area, widely used, is not a coherent delimitation criterion and the 50 ha threshold for differentiating between water bodies and rivers does not seem coherent and is questioned here.

Conclusion

Before the initiation of this doctoral thesis, the homogeneity of the pond's water column (Loup, 1974) had already been questioned in the vertical dimension and discussed according to time scales (Touchart, 2001). To achieve an additional dimension, our main hypothesis, which was the heterogeneity of the pond following a plan, was confirmed throughout our work. We quantified and

mapped it, and studied, characterized and discussed the causes of its implementation and destruction. The complex morphology, in more or less independent basins, in more or less closed bays, the surrounding vegetation, the fetch and its influence on mechanical convection, are the three main parameters favoring the distinction of water masses in horizontal dimensions. Our secondary hypothesis could not, however, be confirmed, especially because, during the three years of measurements, the ponds studied did not undergo any modification of their hydraulic installations (there was, for example, no replacement of the weir by a monk, or the completion of a diversion). Nevertheless, we were able to map the temperature differences between the dam and the center of the basins, and give some initial quantifications of the time during which the hot water masse is pushed towards the water outlets, and to distinguish, in the Baerenthal pond, , the different water masses closest to the different hydraulic development systems.

The analysis of three French ponds of different morphologies, a medium deep, a small deep one and an intermediate one in terms of depth and area, made it possible to establish a model of the thermal functioning of these environments. These bodies of water function separately from the lake, which we had to characterize and define. The pond, whose model is based on the three study areas, follows a discontinuous polymicity with alternating mixing and stratification from several days to decades. This rapid alternation brings calories through the deepest layers during each mixing following a direct stratification. This alternation generates the particularity of the heat budget of these environments with regard to that of the lakes. We measured a relatively high heat budget, between 2941 and 3834 cal/cm², despite the shallow depth of these small bodies of water. The analysis of the three ponds studied in this thesis, as well as the contribution of data from other Limousin ponds (Touchart, 2001, 2007, 2016) or Irish (Allot, 1986) and Estonian lakes, confirmed the importance of the mean depth in calculating the heat balance of water bodies, already highlighted by Gorham (1964). Since the latter's equation only applies to large lakes (Touchart, 2016), it was necessary to create a new one to directly estimate the heat budget of small water bodies based on knowledge of their average depth. The equation was tested and measured in the former administrative region of Limousin, giving a calorific value of the 14,000 ponds between 2.9^{E15} and 3.4^{E15} calories per year. By way of comparison, the Bort les Orgues reservoir, located in the same region and covering 10 % of the total surface area of the ponds, has a calorific value representing 80 % of that of all the small Limousin waterbodies. This research makes it possible to separate ponds from lakes and in particular from large lakes in regard to their thermal functioning and calorific capacity. Taking this dissociation into account allows for a better approach to the management of stagnant aquatic environments.

In the scientific literature on water body heterogeneity, the horizontal scale is rarely considered. In this thesis, we have placed this aspect of thermal zonation at the core of the study on small water

bodies. The heat balance, traditionally calculated at the deepest point, was compared with the spatialized one, based on several measurements within the pond. The difference in values between a heat budget calculated at the pavement level, often far from the gravity center of the pond, and the spatialized one, is sometimes more than 15%. These first comparisons highlight significant differences caused mainly by external forcing. The need to map and quantify these differences has led us to create a new indicator based on calorific exchanges within water bodies. The indicator, which we have named the heat center (Choffel et al., 2018), is based on the gravity center (Schmidt, 1928, Dussart, 1966) however not on density variations anymore but on temperature variations. A second and third dimension, in latitude and longitude, have been added. The new indicator allows a detailed analysis of the heat distribution within the water body in three dimensions, four when these differences are varied over time. These variations have been mapped and quantified and provide a better understanding of the heat dispersion influenced by external and internal forcing in the water body. The heat center can be used to complete the analyses on the vertical component and thus use the horizontal component as an additional dissociation of ponds and lakes.

The complex shape of the ponds, the presence of surrounding vegetation on their banks, the arrival of water by tributaries or by groundwater are all elements that can develop a punctual or durable spatial heterogeneity, and more or less localized in the pond. We have been able to demonstrate that, even for the smallest of them, ponds can develop a spatial heterogeneity of temperature. This thermal zonation is sometimes punctual, sometimes durable or cyclical, and its importance depends on the ratio between the total volume of the water body and the volume in which temperature is modified. On a large multi-lobed pond, external forcing caused by the wind is the main factor in the thermal dissociation of water masses. Depending on the prevailing winds, this one will be more or less reduced in importance and have a more or less deep action. Temperature differences can be significant, with a difference of more than 10°C measured within the pond. On a very small pond, the fetch is too short to disturb the heat distribution, so other factors, such as the presence of a localized riparian in some areas, can cause spatial heterogeneity. Solar radiation is reduced for part of the day in the shaded area, limiting the increase in surface temperature. The differences between the shaded and sunny part of the pond are at most 3°C in the case of the pond studied. The gaps occur every sunny day from spring to late summer, usually between 11 a.m. and 8 p.m., before the loss of thermal stratification by night cooling. Hydrological inputs, if they are at temperatures different from those of the lentic environment, lead to dissociations of water masses measurable by temperature and conductivity. These differences depend on the ratio between the incoming flow and that of the water body. For a pond with a short residence time, the tributary partially influences the thermal functioning and this disturbance is mainly visible at the level of the pond tail, when the temperature

differences are the highest. The lotic characteristics are transformed into lentic characteristics about 50 to 100 meters from the river entrance. The diving of the water from the colder stream into the pond can be measured locally, while at the pavement level, the arrival of the tributary is no longer felt. On groundwater dependent water bodies, a spatial heterogeneity of temperature can be observed, often located at one or more points on the water body, where the groundwater is in contact with the lentic water body, without affecting its totality. The groundwater supply was mapped by taking temperature and conductivity measurements in the ground layers. This methodology makes sense in the case of groundwater inflows and makes it possible to precisely locate the entry zones. During winter or in autumn homothermic conditions, it is possible to measure these water inflows since they constitute plumes that disturb the thermal structure. In homothermic at 4°C, the groundwater inflow zones are the only ones in reverse stratification while the rest of the water body is in homothermic mode. During winter, this hydrological inputs of warm water from groundwater, which is warmer than the maximum density temperature, reinforces and disrupts reverse stratification in some areas, particularly for dimictic lakes.

Spatial analysis makes it possible to make modest contributions to the management of stagnant aquatic environments. Currently, most management proposals are based on the vertical functioning of the pond. Our study proposes an improvement in management, by taking into account horizontal dimensions in addition to the vertical dimension. We have pointed out that it is possible to analyze the water body as a multitude of water masses and thus provide a possible solution to the contradiction or dilemma suffering from the need for hot water inside the pond but from a discharge of fresh water into the downstream watercourse. The new indicator created, the thermal center, makes it possible to anticipate heat emission to the pavement based on knowledge of meteorological data. When the pond has several water outlets, or a monk who can intervene the choice in the depth of water intake, the analysis of the thermal center allows to optimize these management systems in order to limit the thermal risk downstream. Knowledge of the general trends of the thermal center allows a consistent location, in advance, of the water outlet and the type of outlet recommended. In the prevailing wind, a bottom or mid-bottom intake will have a reduced utility by plunging warm surface waters to the bottom. On very small ponds where the surface area does not allow wind to travel over the water surface, the presence of a shaded area at the weir can significantly limit the downstream thermal impact by reducing the surface temperature to 3°C during the maximum thermal phases. The consideration of the spatial heterogeneity of the pond in this thesis calls into question the effectiveness of taking measurements at a reduced time step and at a single depth for these small, rapidly evolving water bodies. The presence of bays, shaded areas covering a large part of the pond, spring water supply, tributary or groundwater can reduce the effectiveness of single-

point measurement. This methodology recommended by the WFD 2000 for water bodies larger than 50 ha can be extended, at the latter's request, to those of a smaller surface area and therefore concern more ponds. The physico-chemical characteristics, caused by a higher stratification at the pavement than for the rest of the pond, are not necessarily representative of the entire body of standing water. Regular monitoring at several points would make it possible to better diagnose these water bodies.

Finally, the dam water body is considered in this thesis as an environment at the center of exchanges between rivers and water bodies. It is the receiver of its upstream environment and the driving force behind its downstream characteristics. It was therefore decided to study the influences of dam ponds by taking into account the internal functioning of the pond. This particularity highlights the importance of the mixing and stratification phases in the impact study of ponds. For weir ponds, downstream maxima are measured during the pond stratification phases. The deeper the water body is and the longer the residence time, the greater the ability of the ponds to stratify. Because of these characteristics, the choice has been made to take calories into account as a measure of exchanges between the stream, its temperature and flow rate, and the pond, its temperature and its volume. The volume of the pond plays a major role in its thermal impact on the watercourse, separating small, low volume, low impact water bodies from large, high volume ponds with a greater measured downstream influence. Just as there is a differentiation within ponds according to their volume, this characteristic is all the truer when applied between ponds and dam lakes. The latter have a much stronger downstream influence than ponds, due to their volume which can exceed one million cubic meters, while it is difficult to reach a few thousand to a hundred thousand cubic meters in ponds. This difference is perceived in the distance influenced in the downstream territory, less than 10 km for the largest ponds, while it can exceed hundreds of kilometers for the reservoirs.

TABLES

TABLES DES FIGURES

FIGURE 1: ORGANISATION DE L'EVOLUTION EPISTEMOLOGIQUE DU BILAN THERMIQUE DES PLANS D'EAU (TOUCHART, 2016)	31
FIGURE 2: SCHEMA DES ECHANGES CALORIFIQUES DU BILAN THERMIQUE EN ETANG	32
FIGURE 3: STRUCTURE THERMIQUE ET OPTIQUE D'UN LAC (GOLDMAN ET HORNE, 1983)	37
FIGURE 4: LES PLANS D'EAU ET LEUR REGIME THERMIQUE (TOUCHART, 2007)	57
FIGURE 5: COMPARAISON DES AIRES D'ALIMENTATION ET FONCTIONNEMENT THERMIQUE DES DIFFERENTS PLANS D'EAU (HAYES ET AL., 2017, MODIFIE ET ADAPTE)	59
FIGURE 6: CARTES DES REGIONS D'ETANGS (GAUCHE) ET DE LA LOCALISATION DES ETANGS (DROITE) SUR LE TERRITOIRE DE LA FRANCE METROPOLITAINE (BARTOUT ET TOUCHART, 2013)	74
FIGURE 7: FONCTIONNEMENT DU MOINE TYPIQUE EN LIMOUSIN EN HAUT (BARTOUT, 2006), PHOTO DE MOINES SUR DES ETANGS ASSECHES DE LA ZINSEL DU NORD, EN BAS A GAUCHE, VU D'EN HAUT (A DROITE) (Q. CHOFFEL, 2018).	85
FIGURE 8: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE DERIVATION (MILLOT, 2015).....	86
FIGURE 9: SCHEMA DES DEUX TYPES DE DERIVATION MAJEURS (TOUCHART ET BARTOUT, 2010).....	87
FIGURE 10: PROFIL EN LONG DE LA CHAUSSEE DE L'ETANG DE LA RAMADE (SOMIVAL, 2012)	92
FIGURE 11: CARTE DE LOCALISATION DU BASSIN VERSANT DE L'ETANG DE LA RAMADE. CHOFFEL ET AL., 2017	96
FIGURE 12: CARTE D'OCCUPATION DES SOLS DU BASSIN VERSANT DE LA RAMADE (CHOFFEL, 2017)	97
FIGURE 13: CARTE BATHYMETRIQUE DE L'ETANG DE LA RAMADE. DONNEES: AQUABIO, 2011. REALISATION Q. CHOFFEL, 2017 .	98
FIGURE 14: CARTE DU BASSIN VERSANT DE L'ETANG DE RILHAC – IMAGE SATELLITE, CARTE D'OCCUPATION DES SOLS ET PHOTOGRAPHIE DE L'ETANG DU CHATEAU A RILHAC AVEC LA BUTE VEGETALISEE SUR LA GAUCHE ET DES CHAMPS EN ARRIERE PLAN. CLICHE Q. CHOFFEL, JUIN 2018	101
FIGURE 15: CARTE BATHYMETRIQUE DE L'ETANG DE RILHAC ET DE SON ENVIRONNEMENT. CLICHE Q. CHOFFEL, JUIN 2018	102
FIGURE 16: CARTES DE LOCALISATION DE L'ETANG DE BAERENTHAL DANS SON BASSIN VERSANT AVEC LA CARTE BATHYMETRIQUE. DONNEES BATHYMETRIQUES : LE RIED BLEU, 2017, REALISATION : Q. CHOFFEL, 2018.....	103
FIGURE 17: CARTE DE L'OCCUPATION DES SOLS DU BASSIN VERSANT DE L'ETANG DE BAERENTHAL. Q. CHOFFEL, 2017	109
FIGURE 18: CARTE DE LA REPARTITION DES PLANS D'EAU EN EUROPE (BARTOUT ET TOUCHART, 2013).....	113
FIGURE 19: CARTE DE LOCALISATION DE LA RESERVE DE KURTNA ET DES ACTIVITES ANTHROPIQUES AVOISINANTES (TOUCHART ET AL., 2013).....	115
FIGURE 20: CARTE BATHYMETRIQUE DU LAC MARTISKA. PHOTOGRAPHIES DU LAC AVEC PRISE EN GLACE HIVERNALE ET DURANT L'ETE. Q. CHOFFEL, 2017	117
FIGURE 21: CARTE BATHYMETRIQUE DU LAC NÖMME. DONNEES : MARKO VAINU.. Q. CHOFFEL, 2017	118
FIGURE 22: METHODOLOGIE DE MESURES THERMIQUES EN CONTINU. Q. CHOFFEL, 2018	127
FIGURE 23: REPRESENTATION SPATIALE DE LA RESOLUTION DE MESURE PONCTUELLES	130
FIGURE 24:CAPTEUR DE MESURE D'OXYGENE DISSOUS, SOURCE : PROSENSOR	136
FIGURE 25: METHODOLOGIE DE DECOUPAGE DES STRATES VOLUMIQUES EN ETANG. Q. CHOFFEL, 2016	139
FIGURE 26: CALCUL DE LA CONTENANCE CALORIFIQUE HORAIRE A PARTIR DES DONNEES THERMIQUES ET DE LA BATHYMETRIE DU PLAN D'EAU. Q. CHOFFEL, 2017	140
FIGURE 27: TRAITEMENT SATELLITE DE LA TEMPERATURE DE L'EAU DE 4 ETANGS LIMOUSINS. SOURCE : PIERRE-ALAIN DANIS, POLE PLAN D'EAU AFB-IRSTEA, AIX EN PROVENCE, 21 AVRIL 2016	146
FIGURE 28: ETUDE COMPARATIVE DE 4 INTERPOLATIONS DES MESURES THERMIQUES PONCTUELLES. Q. CHOFFEL, 2018.....	151
FIGURE 29: SCHEMA DE LA DECROISSANCE DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR DANS UN ETANG. Q. CHOFFEL, 2018.....	154
FIGURE 30: PROFIL DE VARIATION DE DENSITE AINSI QUE DE N SELON LA PROFONDEUR DANS L'OCEAN ATLANTIQUE (GILL, 1982)	157
FIGURE 31: EVOLUTION DE LA FREQUENCE DE BRÜNT-VÄISÄLÄ (LIGNE NOIRE) ET DE LA TEMPERATURE (POINTILLE) EN FONCTION DE LA PROFONDEUR SUR L'ETANG DE RILHAC. Q. CHOFFEL, 2018	158
FIGURE 32: EVOLUTION DE LA STRUCTURE THERMIQUE DE L'ETANG DE CIEUX SUR LA JOURNEE DU 6-7 JUIN 2002 (TOUCHART ET AL., 2014).....	159
FIGURE 33: EVOLUTION TEMPORELLE DES DIFFERENTS INDICATEURS DE STABILITE DE LA COLONNE D'EAU D'UN ETANG. Q. CHOFFEL, 2018.....	165
FIGURE 34: ETUDE ANALYTIQUE DE LA CONTENANCE CALORIFIQUE D'UN PLAN D'EAU. ETANG DE LA RAMADE, AVRIL A SEPTEMBRE 2016. MODELISATION: J. PRATS, 2016 . Q. CHOFFEL, 2019	173
FIGURE 35: ANALYSE DE CORRELATION ENTRE LA TEMPERATURE DE L'AIR ET LA CONTENANCE CALORIFIQUE DES PLANS D'EAU ETUDIES	174
FIGURE 36: TEMPERATURES MOYENNES JOURNALIERES A LA STATION METEO FRANCE DE LA COURTINE, DU 1ER MAI 2016 AU 10	

OCTOBRE 2018.....	180
FIGURE 37: EVOLUTION HORAIRE DE LA CONTENANCE CALORIFIQUE DE MARS 2016 A OCTOBRE 2018 SUR L'ETANG DE LA RAMADE	182
FIGURE 38: SOMME DES STABILITES DANS UN ETANG DE 2,5 M DE PROFONDEUR MAXIMALE. ETANG DE BAERENTHAL, Q. CHOFFEL	184
FIGURE 39: PROFILS THERMIQUES A PLUSIEURS INSTANTS DE LA JOURNEE, ETANG DE BAERENTHAL, 7 JUILLET 2018.....	185
FIGURE 40: EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE A 2 M DE PROFONDEUR, ETANG DE BAERENTHAL.....	187
FIGURE 41: TENEURS EN OXYGENE DISSOUS DE SURFACE (GRIS) ET A 2M DE PROFONDEUR (NOIR). A DROITE, TENEURS EN OXYGENE DISSOUS DANS LA COLONNE D'EAU DE L'ETANG DE BAERENTHAL EN PHASE DE STRATIFICATION THERMIQUE (LE 17/07/2018 A 17H).....	189
FIGURE 42: EVOLUTION TEMPORELLE DE LA MOYENNE DE L'OXYGENE DISSOUS SUR LA COLONNE D'EAU DE L'ETANG DE BAERENTHAL.	191
FIGURE 43: EVOLUTION TEMPORELLE DE LA CONTENANCE CALORIFIQUE DES ETANGS DE RILHAC (GRIS), LA RAMADE (NOIR) ET BAERENTHAL (ROUGE).....	193
FIGURE 44: EVOLUTION ANNUELLE DE LA TEMPERATURE EN TROIS DIMENSIONS D'UN ETANG PEU PROFOND. ETANG DE LA RAMADE, 2017. Q. CHOFFEL, 2018	195
FIGURE 45: EVOLUTION DE LA CONTENANCE CALORIFIQUE D'UN ETANG PEU PROFOND.....	196
FIGURE 46: STRUCTURE THERMIQUE DES ETANGS DE LA RAMADE (POINTILLE) ET DE BAERENTHAL (NOIR) LORS DE LEUR MAXIMUM CALORIFIQUE DE L'ANNEE 2018, LE 4 AOUT A 17H.....	198
FIGURE 47: GRAPHIQUE TRI-DIMENSIONNEL DE LA STRUCTURE THERMIQUE D'UN ETANG PROFOND SUR UNE ANNEE. ETANG DE RILHAC, 2017. Q. CHOFFEL, 2018	200
FIGURE 48: EVOLUTION DE LA CONTENANCE CALORIFIQUE D'UN ETANG PROFOND- ETANG DE RILHAC, 2018. Q. CHOFFEL, 2018	202
FIGURE 49: CORRELATION ENTRE LA RACINE CUBIQUE DU VOLUME ET LE BILAN THERMIQUE. GORHAM, 1964.....	206
FIGURE 50: GRAPHIQUE DE CORRELATION ENTRE LE BILAN THERMIQUE ET LA PROFONDEUR MOYENNE DE PETITS PLANS D'EAU (SOURCES: ALLOT, 1986, TOUCHART, 1999 A 2002, CHOFFEL, 2016 A 2018).....	211
FIGURE 51: LOCALISATION DES ETANGS DANS LA REGION DU LIMOUSIN (SOURCE: P. BARTOUT, 2013)	212
FIGURE 52: CONTENANCE CALORIFIQUE DES TERRITOIRES ET SOUS BASSINS VERSANTS LIMOUSIN. Q. CHOFFEL, 2019.....	215
FIGURE 53: STABILITE DE L'ETANG MONTRANT LES PHASES DE STRATIFICATION ($S>0$) ET DE BRASSAGE (GRIS) ET ECART DE TEMPERATURE AMONT-AVAL DE L'ETANG DE LA RAMADE (NOIR)	226
FIGURE 54: STABILITE DE L'ETANG MONTRANT LES PHASES DE STRATIFICATION ($S>0$) ET DE BRASSAGE (GRIS) ET ECART DE TEMPERATURE AMONT-AVAL DE L'ETANG DE BAERENTHAL (NOIR)	228
FIGURE 55: TEMPERATURE MOYENNE ESTIVALE (JUILLET ET AOUT) SUR LE COURS D'EAU PRINCIPAL DE LA ZINSEL DU NORD. Q. CHOFFEL, 2018	229
FIGURE 56: ZONES D'INFLUENCE MOYENNE ET MAXIMALE ANNUELLES ESTIMEES A L'AVANT DE L'ETANG DE BAERENTHAL. Q. CHOFFEL, 2018.....	231
FIGURE 57: PERTURBATIONS DU COURS D'EAU PAR L'ABSENCE DE RIPISYLVE OU FACTEURS ANTHROPIQUES. Q. CHOFFEL, 2019 (D'APRES TOUCHART, 2007)	232
FIGURE 58: TEMPERATURES DU COURS D'EAU AMONT (GRIS-POINTILLE) ET AVAL (NOIR) DE L'ETANG DE BAERENTHAL (SORTIE PAR DEVERSOIR)	236
FIGURE 59: TEMPERATURES DU COURS D'EAU AMONT (GRIS-POINTILLE) ET AVAL (NOIR) DE L'ETANG DE LA RAMADE (SORTIE MIXTE DE FOND ET SURFACE)	236
FIGURE 60: ANALYSE DE L'EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE A LA SURFACE DE L'ETANG (GRIS), A 2M (NOIR) ET DU COURS D'EAU AMONT (ROUGE)	239
FIGURE 61: CONTENANCE CALORIFIQUE DES COURS D'EAU DE LA ZINSEL DU NORD ET SES AFFLUENTS (Q. CHOFFEL, 2019)	242
FIGURE 62: COUPE DES DEBITS MOYENS ESTIVAUX DE LA ZINSEL DU NORD, DE LA SOURCE (CONFLUENCE BIELDMUEL ET KRAPPENTHAL) A L'AVANT. Q. CHOFFEL, D'APRES LES DONNEES MESUREES SUR LE TERRAIN (F. DONATI, A. CAIRAULT) ET DES MODELISATIONS. Q. CHOFFEL, 2019.....	243
FIGURE 63: ESTIMATIONS DE LA REDUCTION CALORIFIQUE ESTIVALE SUITE A LA MISE EN PLACE D'UNE DERIVATION SUR L'ETANG DE BAERENTHAL (Q. CHOFFEL, 2019)	248
FIGURE 64: CARTES DES FETCHS POTENTIELS CONTINU, FETCHS CONTINU ET MODULES SUR L'ETANG DE LA RAMADE (Q. CHOFFEL, 2016).....	252
FIGURE 65: METHODOLOGIE DE CREATION DES BASSINS ETUDIES DANS UN GRAND ETANG MULTILOBE (ETANG DE LA RAMADE) ...	254
FIGURE 66: IMAGE SATELLITE DE L'ETANG DE LA RAMADE. ANALYSE THERMIQUE DE SURFACE. PIERRE-ALAIN DANIS, POLE PLAN	

D'EAU AFB-IRSTEA, AIX EN PROVENCE, 19 AVRIL 2016.....	255
FIGURE 67: CARTE BATHYMETRIQUE DE L'ETANG DE RILHAC. REALISATION : Q. CHOFFEL, CAMPAGNE DE MESURES 2017, CHOFFEL Q. ET AL DOMANY M., Q. CHOFFEL, 2018.....	257
FIGURE 68: CARTES DE LOCALISATION DES CHAINES DE THERMOMETRES ENREGISTREURS SUR L'ETANG DE BAERENTHAL. Q. CHOFFEL, 2019.....	259
FIGURE 69: DYNAMIQUE THERMIQUE DE L'ETANG DE LA RAMADE LE 8 AOUT 2016 A 18H. CARTOGRAPHIE DE LA TEMPERATURE (A), VUE 2D1/2 DE LA POSITION DE LA THERMOCLINE (B), PROFILS THERMIQUES (C), CARTOGRAPHIE DE LA VITESSE DU VENT NECESSAIRE AU BRASSAGE DE LA MASSE D'EAU (M/S). CHOFFEL ET AL., 2018.....	264
FIGURE 70: COUPE THERMIQUE DE L'ETANG DE LA RAMADE DU RUISSEAU DE LA RAMADE A LA CHUSSEE DE L'ETANG, LE 8 AOUT 2016 A 18H. CHOFFEL ET AL., 2018	265
FIGURE 71: REPRESENTATION SPATIALE DE LA REPARTITION DE CHALEUR AU SEIN DE L'ETANG DE LA RAMADE DE LA SURFACE A 1M DE PROFONDEUR. LE 3 AOUT 2016 A 17H. CHOFFEL ET AL., 2018	266
FIGURE 72: CARTE DE LA VARIATION SPATIALE DE LA TEMPERATURE DE SURFACE (A) DE L'ETANG DE LA RAMADE AINSI QU'UNE COUPE THERMIQUE NORD-SUD (B) LE 1ER JUIN A 01H00. CHOFFEL ET AL., 2018.....	268
FIGURE 73: CARTES DE TEMPERATURE DE SURFACE SELON LA DIRECTION DES VENTS, Q. CHOFFEL, 2019.....	270
FIGURE 74: EVOLUTION COMPAREE DE LA TEMPERATURE DE SURFACE A LA BOUEE A L'OMBRE (LIGNE NOIRE) ET CELLE AU SOLEIL (POINTILLES), DU 25 AU 27 JUIN 2018.....	274
FIGURE 75: ECARTS THERMIQUES ENTRE LES ZONES OMBRAGEES ET AU SOLEIL. VARIATION DU RAYONNEMENT MAXIMAL JOURNALIER ET DU POURCENTAGE D'HUMIDITE REELLE	275
FIGURE 76: CARTOGRAPHIE DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE L'ETANG DE RILHAC LE 11 JUILLET 2018 A 11H. Q. CHOFFEL, 2018	276
FIGURE 77: PROFIL THERMIQUE VERTICAL DES DEUX SECTEURS ETUDIES DE L'ETANG DE RILHAC, A L'OMBRE ET AU SOLEIL	277
FIGURE 78: MESURES DE TEMPERATURES TOUTES LES 10 MINUTES DANS L'ETANG DE RILHAC, AU POINT LE PLUS PROFOND, DU 26 AOUT AU 1ER SEPTEMBRE 2017. Q. CHOFFEL, 2019	278
FIGURE 79: COURBES DE TEMPERATURE DE SURFACE DES SECTEURS A LA CHUSSEE (NOIR), AU CENTRE (ROUGE) ET A L'AMONT (BLEU) DE L'ETANG DE BAERENTHAL EN 2018	281
FIGURE 80: COUPE THERMIQUE DANS L'ETANG DE BAERENTHAL DE L'AMONT VERS L'AVAL. LE 10 AOUT 2018 A 16H. Q. CHOFFEL, 2018.....	282
FIGURE 81: CARTE DE TEMPERATURE DE SURFACE (A) ET COUPE THERMIQUE (B) SUR L'ETANG DE BAERENTHAL -19 JUIN 2018. Q. CHOFFEL, 2018	284
FIGURE 82: CARTE DE CONDUCTIVITE SPECIFIQUE DE SURFACE (A) ET COUPE OUES-EST (B) DE L'ETANG DE BAERENTHAL - 19 JUIN 2018. Q. CHOFFEL, 2018.....	285
FIGURE 83: CARTE DE LA TEMPERATURE DE SURFACE (A), CARTE DE LA CONDUCTIVITE SPECIFIQUE MAXIMALE (B), COUPE THERMIQUE (C) ET COUPE DE CONDUCTIVITE SPECIFIQUE (D) DU LAC NÖMME.....	289
FIGURE 84: EVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR DES 3 LACS ETUDIES DE LA RESERVE DE KURTNA, ESTONIE. 6-7 JUIN 2017	290
FIGURE 85: ANALYSE CARTOGRAPHIQUE DES TEMPERATURES DE SURFACE ET DE FOND DU LAC MARTISKA EN HIVER. PROFILS ET COUPES THERMIQUES. Q. CHOFFEL, 2017	295
FIGURE 86: ANALYSE CARTOGRAPHIQUE DES TEMPERATURES DE SURFACE ET DE FOND DU LAC MARTISKA EN HOMOTHERMIE AUTOMNALE. PROFILS ET COUPES THERMIQUES. Q. CHOFFEL, 2017	297
FIGURE 87: : CARTE DE CONDUCTIVITE SPECIFIQUE DE SURFACE (GAUCHE) ET DE FOND (DROITE) DU LAC KURADI. GRAPHIQUE DE L'EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE SPECIFIQUE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR- LE 12 NOVEMBRE 2018. Q. CHOFFEL, 2018.....	299
FIGURE 88: ÉVOLUTION DU POURCENTAGE D'ERREUR ENTRE LA METHODE TRADITIONNELLE (BT1) ET SON RENOUVEAU SPATIALISE (BTA). ÉTANG DE LA RAMADE MARS A SEPTEMBRE 2016. Q. CHOFFEL, 2017	311
FIGURE 89: MARGES D'ERREUR (NOIR) ET SOUSTRACTION DES CONTENANCES CALORIFIQUES BRUTES ENTRE B1, A LA CHUSSEE, ET B2, AU CENTRE (ROUGE) SUR L'ETANG DE LA RAMADE DU 17 AU 21 JUILLET 2016. Q. CHOFFEL ET AL., 2017.....	312
FIGURE 90: VITESSE (COURBES) ET DIRECTION (ETOILES) DES VENTS AU-DESSUS DE L'ETANG DE LA RAMADE, DU 17 AU 21 JUILLET 2016. Q. CHOFFEL ET AL., 2017	312
FIGURE 91: VARIATION HORAIRE DE LA STABILITE EN PLUSIEURS POINTS DE L'ETANG DE LA RAMADE	314
FIGURE 92: EXEMPLE D'EVOLUTION DU CENTRE DE GRAVITE D'UN ETANG EN FONCTION DU TEMPS, A L'ECHELLE VERTICALE. ETANG DE LA RAMADE, DU 21 MARS AU 14 SEPTEMBRE 2016.....	316
FIGURE 93: EVOLUTION DU CENTRE THERMIQUE DE L'ETANG DE RILHAC DANS SES COMPOSANTES LONGITUDINALES (A) LATITUDINALES (B) ET VERTICALE (C) AVEC SA REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE EN DEUX DIMENSIONS (D). CHOFFEL ET AL.,	

2018.....	321
FIGURE 94: EVOLUTION DU CENTRE THERMIQUE DE L'ETANG DE LA RAMADE DANS SES COMPOSANTES LONGITUDINALE (A) LATITUDINALE (B) ET VERTICALE (C) AVEC SA REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE EN 2D (D).....	323
FIGURE 95: ANALYSE CARTOGRAPHIQUE DE LA REPARTITION DE CHALEUR LORS DE DEUX POSITIONS EXTREMES DU CENTRE THERMIQUE DE L'ETANG DE LA RAMADE. Q. CHOFFEL, 2017.....	324
FIGURE 96: EVOLUTION DU CENTRE THERMIQUE DE L'ETANG DE BAERENTHAL. Q. CHOFFEL, 2019.....	327
FIGURE 97: VARIATIONS DE LA STRUCTURE THERMIQUE A LA CHAUSSEE (ROUGE) ET AU CENTRE DE L'ETANG (NOIR) DE LA RAMADE (A). ECARTS THERMIQUES AMONT-AVAL (B) ET VITESSE ET DIRECTION DES VENTS (C) DU 24 JUILLET AU 7 AOUT 2016.....	334
FIGURE 98: ETUDE DE L'EVOLUTION LATITUDINALE DU CENTRE THERMIQUE D'UN ETANG (A) EN FONCTION DE LA VITESSE ET DIRECTION DU VENT (B) AINSI QUE DE LA TEMPERATURE DE L'AIR (C). ROSE DES VENTS AVEC OCCURRENCE A PROXIMITE DE L'ETANG (D).....	337
FIGURE 99: EVOLUTION LATITUDINALE DU CENTRE THERMIQUE (HAUT) ET ECARTS DE TEMPERATURE AMONT-AVAL DE L'ETANG (BAS) SUR L'ETANG DE LA RAMADE. Q. CHOFFEL, 2019.....	340
FIGURE 100: ECART DE TEMPERATURE AMONT-AVAL DE L'ETANG DE BAERENTHAL (BAS) ET EVOLUTION LONGITUDINALE DU CENTRE THERMIQUE (HAUT) DE L'ETANG. Q. CHOFFEL, 2019.....	341
FIGURE 101: COUPE THERMIQUE NORD-SUD DE L'ETANG DE LA RAMADE PAR VENT DE NORD-OUEST (A) ET SUD-SUD-OUEST (B). CHOFFEL ET AL., 2018, MODIFIE.....	343
FIGURE 102: TEMPERATURES MOYENNES HORAIRES DES ETANGS ET SEUILS LETAUX DE LA TRUITE COMMUNE (SALMO TRUTTA). SOURCES : BRASH ET AL., 1958, MACCRIMMON & CAMPBELL, 1969, MILLS, 1971. REALISATION : Q. CHOFFEL, 2019.....	346
FIGURE 103: QUANTITE D'OXYGENE DISSOUS MOYENNE DANS LA COLONNE D'EAU DE L'ETANG DE BAERENTHAL AU NIVEAU DE LA CHAUSSEE. REALISATION: Q. CHOFFEL, 2019.....	347
FIGURE 104: PROFONDEUR DISQUE DE SECCHI RAMADE SUR LES ANNEES 2016 ET 2017. Q. CHOFFEL, 2019, D'APRES LA METHODE DE SOULIGNAC ET AL., 2018.....	350
FIGURE 105: VARIATION SPATIALE, EN 3D, DE LA TEMPERATURE DE L'ETANG DE LA RAMADE (A). COMPARAISON DES STABILITES AUX DIFFERENTS POINTS DE L'ETANG (B). Q. CHOFFEL, 2019.....	352
FIGURE 106: DISSOCIATION DES TYPES DE PLANS D'EAU EN FONCTION DU BILAN THERMIQUE ET DE LA PROFONDEUR MOYENNE. SOURCES: ALLOT, 1986, TOUCHART, 2016. Q. CHOFFEL, 2018.....	358

TABLE DES PHOTOGRAPHIES

PHOTO 1: ETANGS EFFACES SUR LES BASSINS VERSANTS DE LA ZINSEL DU NORD (GAUCHE) ET DE LA SAUER (DROITE). PHOTO PRISE DEPUIS L'ANCIENNE CHAUSSEE (Q. CHOFFEL, 2018)	63
PHOTO 2: EXEMPLES DE COURS D'EAU DE TETE DE BASSIN (AFFLUENTS DE LA ZINSEL DU NORD, Q. CHOFFEL, 2018).....	78
PHOTO 3: EXEMPLE DE DEVERSOIR EN CASCADE D'UN ETANG DES VOSGES DU NORD, AFFLUENT DE LA ZINSEL DU NORD. Q. CHOFFEL, 2018	84
PHOTO 4: L'ETANG DE LA RAMADE QUI "FUME" LIE AUX ECHANGES ENTRE L'EAU DE L'ETANG ET L'ATMOSPHERE, L'ETANG PLUS CHAUD RECHAUFFE L'AIR FRAIS MATINAL ET PROVOQUE UN BROUILLARD DE DRAINAGE. LE 11 JUIN 2018 A 6H (CLICHE : Q. CHOFFEL, 2018).....	91
PHOTO 5: ETANG DE LA RAMADE EN JUIN 2018 AVEC DES BARQUES A DISPOSITION POUR LES PECHEURS. ZONE DE BAINNADE ET RECREATION AVEC RESTAURATION SUR LES BORDS DE L'ETANG (BAS). CLICHES : Q. CHOFFEL	100
PHOTO 6: : L'ETANG DE BAERENTHAL DEPUIS LA CHAUSSEE (HAUT) SORTIE D'EAU DE DEVERSOIR DE L'ETANG DE BAERENTHAL VERS LE RAMSTEIN (GAUCHE) ET SITE DE BAINNADE DE L'ETANG DU RAMSTEIN (DROITE). Q. CHOFFEL, 2018	104
PHOTO 7: AFFLEUREMENTS DE GRES VOSGIEN A PROXIMITE DE L'ETANG DE BAERENTHAL (CLICHE Q. CHOFFEL, AVRIL 2018).....	106
PHOTO 8: PETITS ETANGS SUR LES AFFLUENTS DE LA ZINSEL DU NORD. CLICHE: Q. CHOFFEL, 2018	107
PHOTO 9: MESURES A L'AIDE DU CASTAWAY EN LAC GELE (EN HAUT A DROITE), COURS D'EAU (EN BAS A DROITE) ET EN ETANG (GAUCHE). CLICHES: Q. CHOFFEL, OPERATEURS: F. DONATI ET Q. CHOFFEL, 2018	129
PHOTO 10: MESURES DE DEBIT EN COURS D'EAU (OPERATEUR F. DONATI, CLICHE: Q. CHOFFEL) ET COURANTOMETRE FLOWTRACKER UTILISE (SOURCE: SOLOSTOCKS.COM).....	133
PHOTO 11: MATERIEL DETAILLE DE MESURE DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES (AL DOMANY, 2017).....	135
PHOTO 12: IMAGE AERIENNE DE L'ETANG DE BAERENTHAL DURANT L'HIVER 2017. BING AERIAL	326

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: DEBITS ENTRANT ET SORTANT DE L'ETANG DE BAERENTHAL, DE FEVRIER 2016 A FEVRIER 2018 SOURCE : ALBAN CAIRAULT, SYCOPARC VOSGES DU NORD, 2018.....	93
TABLEAU 2: PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES TROIS ETANGS ETUDIES ET DE LEUR BASSIN VERSANT	110
TABLEAU 3: OCCUPATION DES SOLS DES BASSINS VERSANTS DES TROIS ETANGS ETUDIES. Q. CHOFFEL, 2017	111
TABLEAU 4: RESOLUTIONS SPATIALES DES SATELLITES BENEFICIANT DE CAPTEURS THERMIQUES (WAWRZYNIAK, 2012)	145
TABLEAU 5: BILAN CALORIFIQUE FLUVIAL DE L'ETANG DE BAERENTHAL.....	177
TABLEAU 7: CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DES PLANS D'EAU UTILISES DANS LA CORRELATION. SOURCES: TOUCHART, 1999 A 2002, ALLOT, 1986 ET CHOFFEL, 2016 A 2018	209
TABLEAU 8: ANALYSES THERMIQUES DE LA DIFFERENCE AMONT-AVAL DES ETANGS DE LA RAMADE ET DE BAERENTHAL DE MARS A SEPTEMBRE	234
TABLEAU 9: RECHAUFFEMENT MOYEN MENSUEL DES DEUX ETANGS ETUDIES	237
TABLEAU 10: COMPARAISONS DES APPORTS CALORIFIQUES AU COURS D'EAU AVAL D'ETANGS CUMULES SUR COURS D'EAU	244
TABLEAU 11: CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES BASSINS DELIMITES DANS L'ETANG DE RILHAC	258

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	15
PARTIE 1 : L'APPORT DU BILAN THERMIQUE ET DES RECHERCHES LIMNOLOGIQUES DANS LES CONTEXTES REGLEMENTAIRES ET GEOGRAPHIQUES ACTUELS CONCERNANT LES ETANGS	25
CHAPITRE 1 : LE BILAN THERMIQUE ET LA TEMPERATURE DE L'EAU, DE LA LIMNOLOGIE LACUSTRE A SON APPLICATION STAGNUSTRE	29
1.1 LE BILAN THERMIQUE: OUTIL SYNTHETIQUE ET INTEGRATEUR DE L'ANALYSE DE LA TEMPERATURE DES PLANS D'EAU.....	29
1.1.1 Contexte historique de calcul du bilan thermique lacustre.....	29
1.1.1.1 La naissance du bilan thermique au 19 ^{ème} siècle.....	29
1.1.1.2 Un bilan thermique lacustre dominé par les échanges atmosphériques.....	32
1.1.1.3 Les échanges secondaires au bilan thermique	35
1.1.2 Le fonctionnement thermique des plans d'eau, une analyse basée sur les lacs	36
1.2 PROPRIETES DE L'EAU ET GEOGRAPHIE DE LA TEMPERATURE : QUELLES PARTICULARITES DES PETITS PLANS D'EAU ?.....	39
1.2.1 La température, le meilleur traceur spatial de l'état physico-chimique de l'eau ?.....	39
1.2.1.1 Les propriétés physiques de l'eau influencées par la température.....	39
1.2.1.2 Une biogéographie aquatique déterminée par la température du milieu?.....	41
1.2.2 L'analyse spatiale des données thermiques, ouverture vers une nouvelle réflexion géographique	45
1.2.2.1 L'analyse spatiale de la température des grands lacs	45
1.2.2.2 Les travaux sur petits plans d'eau mettent également en avant une zonation de la température .	46
1.3 LES PARTICULARITES GEOGRAPHIQUES ET LIMNOLOGIQUES DES ETANGS.....	48
1.3.1 L'objet étang dans son environnement	48
1.3.1.1 Quelle pièce d'eau étudions-nous lorsque l'on parle d'étang?	49
1.3.1.2 L'étang, un plan d'eau artificiel dans sa définition et son fonctionnement	55
1.4 POURQUOI ETUDIER LES ETANGS EN LIMNOLOGIE ?.....	60
1.4.1 L'objet étang dans les politiques et législations environnementales.....	64
1.4.1.1 La loi sur l'Eau et la DCE, socles politiques de gestion des étangs.....	64
1.4.1.2 La continuité écologique: de la destruction des étangs à sa contestation sociale locale.....	66
1.4.2 Approche limnocentrée des liens cours d'eau/plans d'eau	69
CHAPITRE 2 : LOCALISATION DES TERRAINS D'ETUDES AU CŒUR DE REGIONS D'ETANGS	73
2.1 GEOGRAPHIQUE DES ETANGS: UNE PRESENCE MAJEURE DE PETITS PLANS D'EAU DANS LES TETES DE BASSIN	73
2.1.1 La localisation des étangs en régions d'étangs.....	73
2.1.2 Les têtes de bassin, des milieux privilégiés à la présence d'étangs	75
2.1.2.1 Description des têtes de bassin.....	76
2.1.2.2 Les têtes de bassin, un milieu menacé par la présence d'étangs ?	79
2.1.3 Les diverses influences des étangs sur le cours d'eau	79
2.1.3.1 Les effets bénéfiques des étangs	79
2.1.3.2 Les effets négatifs des étangs barrant un cours d'eau	81
2.1.3.3 Les types de sorties d'eau en étang et leurs influences thermiques sur les échanges avec le cours d'eau aval	82
2.2 LES ETANGS ETUDIES: DES ETANGS FRANÇAIS CARACTERISTIQUES DE LEUR REGION AUX PETITS LACS DES HAUTES LATITUDES EUROPEENNES	88
2.2.1 Contexte hydroclimatique des zones d'étude.....	88
2.2.1.1 Le haut Limousin et sa Montagne	89
2.2.1.2 Le plateau des Vosges du Nord.....	92
2.2.1.3 La transition entre les tendances océaniques et continentales des franges de la Baltique.....	93
2.2.2 Caractéristiques hydromorphologiques des étangs étudiés et de leur bassin versant.....	94
2.2.2.1 L'étang de la Ramade, un grand étang ennoyant sa vallée	94
2.2.2.2 L'étang de Rilhac, petit étang profond dans la périphérie limougeaude.....	100
2.2.2.3 L'étang de Baerenthal ennoyant la vallée de la Zinsel du Nord.....	103
2.2.3 Représentativité et extrapolation des terrains d'études aux régions françaises	109
2.2.4 Etude de plans d'eau du nord-est de l'Europe : une ouverture estonienne vers d'autres plans d'eau de petite taille.....	112
2.2.4.1 La région des lacs de Kurtna propice à une étude géographique des influences anthropiques sur le milieu lacustre.....	114

2.2.4.2	L'étude d'un lac de culot glaciaire dans les échanges entre la nappe et le plan d'eau.....	116
2.2.4.3	Etude d'un lac dont la création d'un tributaire artificiel a perturbé son fonctionnement.....	117

PARTIE II : LE BILAN THERMIQUE STAGNUSTRE, METHODOLOGIE DE CALCUL ET ANALYSE DE TROIS ETANGS..... 121

CHAPITRE 3 : METHODES ET OUTILS DE MESURES DE GEOGRAPHIE LIMNOLOGIQUE..... 125

3.1	INSTRUMENTS DE MESURES THERMIQUE, HYDROLOGIQUE ET METEOROLOGIQUE	125
3.1.1	Les mesures thermiques : un indicateur fiable du suivi de la qualité des eaux	125
3.1.1.1	L'intérêt de la prise de mesures thermiques en continu dans les étangs	125
3.1.1.2	L'apport complémentaire des mesures ponctuelles	128
3.1.2	Les mesures hydrologiques : élément essentiel à l'étude des échanges calorifiques entre les différentes masses d'eau.....	130
3.1.2.1	Variations de niveau d'eau des étangs	131
3.1.2.2	Echanges fluviaux dans le calcul du bilan thermique lacustre	132
3.1.3	Les données météorologiques	134
3.1.3	Mesures complémentaires de la qualité de l'eau des plans d'eau	135
3.1.4.1	Mesures d'oxygène	135
3.1	METHODOLOGIE DE MESURE DU BILAN THERMIQUE STAGNUSTRE	138
3.2.1	Methodologie de mesure basée sur celle lacustre.....	138
3.2.2	Outils et méthodes d'analyse des variations spatiales du fonctionnement thermique des petits plans d'eau	141
3.2.3	Interpolation des données thermiques ponctuelles : les cartes de variation spatiale de la température des étangs.....	141
2.2.4.4	L'apport de la télédétection et de la modélisation dans l'analyse thermique des milieu aquatiques	141
2.2.4.5	Méthode de cartographie des discontinuités thermiques.....	148
3.3	QUELS INDICATEURS LIMNIQUES DE LA STRUCTURE DE LA COLONNE D'EAU PEUVENT ETRE UTILISES EN ETANG ?	152
3.3.1	La thermocline et ses variations spatiales	153
	L'évolution de la thermocline en étang.....	153
3.3.2	Les indicateurs de la stabilité de la colonne d'eau.....	155
3.3.2.1	Fréquence de Brunt-Vaisala	155
3.3.2.2	Nombre de Wedderburn	160
3.3.2.3	Stabilité de Schmidt	162
3.3.2.4	Quels indicateurs sont pertinents pour les plans d'eau polymictiques?.....	163

CHAPITRE 4 : LE BILAN THERMIQUE DES PETITS PLANS D'EAU 168

4.1	LE BILAN THERMIQUE D'ETANG COMME MODELE DE FONCTIONNEMENT	168
4.1.1	Evolution générale du bilan thermique de l'étang en tant qu'individu limnique distinct du lac	168
4.1.1.1	Un modèle de bilan thermique basé sur l'analyse de trois étangs sur une année.....	169
4.1.1.2	Les composantes du bilan thermique d'étang	170
4.1.1.3	La part hydrologique du bilan thermique stagnustre	176
4.1.1.4	Variations interannuelles du bilan thermique	179
4.1.2	Stratification thermique et stabilité en étang	182
4.1.2.1	L'importance de la couche de fond dans les échanges calorifiques des étangs.....	185
4.1.2.2	Le rôle des phases de brassage dans l'oxygénation des eaux de fond	188
4.2	ETUDE COMPAREE DE LA DYNAMIQUE THERMIQUE DE TROIS ETANGS FRANÇAIS A MORPHOLOGIES VARIEES	192
4.2.1	Une évolution de la contenance calorifique des trois étangs étudiés	192
4.2.2	Analyse du bilan thermique d'étangs peu profonds.....	193
2.2.4.6	Evolution temporelle de la dynamique thermique d'étang peu profond	194
2.2.4.7	Evolution du bilan thermique d'étang peu profond.....	195
2.2.4.8	Analyse du bilan thermique des journées exceptionnelles	196
4.2.3	Analyse du bilan thermique d'étang profond	199
2.2.4.9	Analyse de l'évolution temporelle de la dynamique thermique d'un étang profond	199
2.2.4.10	Analyse du bilan thermique d'étang profond	201
4.3	Éléments de comparaisons du bilan thermique entre les petits plans d'eau	203
4.3.1	Etablissement d'une extrapolation du bilan thermique à une région d'étangs	204
2.2.4.11	Le bilan thermique et la morphologie des étangs	204
2.2.4.12	Mise en place d'une nouvelle équation d'extrapolation du bilan thermique appliquée aux petits	

plans d'eau 208	
4.3.2	L'extrapolation à l'échelle d'une région d'étangs : le Limousin 212
4.3.3	Répartition géographique de la contenance calorifique des étangs limousins 214
PARTIE III : UNE GEOGRAPHIE THERMIQUE DES MASSES D'EAU CONDITIONNEE PAR LES	
VARIATIONS VERTICALES ET HORIZONTALES DE TEMPERATURE 219	
CHAPITRE 5 : LES TERRITOIRES D'ECHANGES ENTRE LE PLAN D'EAU ET SON ENVIRONNEMENT . 223	
5.1	APPROCHE LIMNOCENTREE DE L'ETUDE DU RISQUE THERMIQUE 223
5.1.1	L'étang en barrage sur cours d'eau : un élément récepteur de l'amont et moteur de son aval ? 224
2.2.4.13	L'influence d'un étang sortie mixte, de surface et de fond 224
2.2.4.14	Etude d'un étang à déversoirs de surface 227
5.1.2	Une influence thermique à l'aval dépendante des aménagements de sortie d'eau 233
2.2.4.15	Des écarts majoritairement dans les cycles thermiques 234
2.2.4.16	Quel est le bénéfice thermique de la mise en place d'un moine ? 237
2.2.4.17	Quelles incidences du moine sur l'oxygénation du cours d'eau aval ? 239
5.2	ANALYSE DES ECHANGES CALORIFIQUES ENTRE SYSTEMES HYDROLOGIQUES DANS L'ETUDE CUMULEE DES ETANGS 240
5.2.1	Analyse des échanges calorifiques au sein d'un bassin versant 240
5.2.2	L'apport calorifique cumulé des étangs influencé par les volumes d'eau 243
5.2.3	La question de l'installation d'une dérivation peut-elle limiter l'impact calorifique ? 245
CHAPITRE 6 : LA REPRESENTATION THERMIQUE DES MASSES D'EAU EN TROIS DIMENSIONS 250	
6.1	MISE EN PLACE D'UNE METHODOLOGIE DE MESURE DE L'HETEROGENEITE SPATIALE D'ETANGS SELON LEUR MORPHOLIES ET LEUR ENVIRONNEMENT 250
6.1.1	Cartes de fetch et bathymétrie : indicateurs d'hétérogénéité spatiale des grands étangs (étang de la Ramade) 251
6.1.2	L'effet de la végétation et de la topographie locale sur les petits étangs (étang de Rilhac) 256
6.1.3	Les mesures du bilan thermique comme synthèse des échanges cours d'eau/ plan d'eau (étang de Baerenthal) 258
6.2	UNE GEOGRAPHIE DU FONCTIONNEMENT THERMIQUE DES PLANS D'EAU DEPENDANTE DE LEUR MORPHOLOGIE? 260
6.2.1	Les grands étangs multilobés propices à la variation spatiale de température 260
6.2.1.1	Etudes de l'influence du vent sur une structure thermique stratifiée 262
6.2.1.2	L'effet d'un vent intense sur la structure thermique d'un étang 267
6.2.1.3	Etude de l'hétérogénéité thermique du plan d'eau selon la direction des vents 269
6.2.2	Peut-il exister des variations spatiales de température au sein de très petits étangs ? 271
6.2.2.1	Des écarts thermiques conséquents en surface 272
6.2.2.2	Une différenciation réduite de la structure thermique de l'étang 276
6.3	L'INFLUENCE DES ECHANGES HYDROLOGIQUES DANS LA ZONATION THERMIQUE 279
6.3.1	L'arrivée d'un tributaire peut-elle perturber la structure thermique d'un plan d'eau ? 279
6.3.1.1	Etude d'un étang au temps de séjour court 279
6.3.1.2	Analyse complémentaire sur un petit lac estonien 286
6.3.2	Influence thermique des échanges entre le plan d'eau et la nappe souterraine 291
6.3.2.1	Analyses des échanges thermiques avec la nappe au sein du lac Martiska 292
6.3.2.2	Analyse complémentaire sur le lac de Kuradi 297
PARTIE IV : L'APPORT DE L'ANALYSE SPATIALE ET DU BILAN THERMIQUE DANS L'ETUDE DES	
ECHANGES CALORIFIQUES ET DANS LA GESTION THERMIQUE DES PLANS D'EAU 303	
CHAPITRE 7 : LE CENTRE THERMIQUE, NOUVEL OUTIL DE QUANTIFICATION DE L'HETEROGENEITE	
SPATIALE DES MASSES D'EAU 307	
7.1	D'UN BILAN THERMIQUE SPATIALISE A LA CREATION DU CENTRE THERMIQUE 307
7.1.1	Apport d'une approche spatiale dans le bilan thermique 307
7.1.1.1	L'utilisation de la moyenne des températures comme première étape vers un bilan thermique spatialisé 308
2.2.4.18	L'analyse séparée des bassins en régions limniques 309
7.1.1	Comparaison des méthodes de calcul 310
7.2	LE CENTRE THERMIQUE, NOUVEL OUTIL D'ANALYSE DE L'EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DU BILAN THERMIQUE D'UN PLAN D'EAU 315

7.2.1	Méthodologie d'élaboration du centre thermique.....	315
7.2.1.1	Une méthode basée sur le centre de gravité d'un plan d'eau	315
7.2.2	La quantification de l'hétérogénéité spatiale à l'aide du centre thermique.....	318
7.2.2.1	Evolution temporelle du centre thermique d'étangs	318
7.2.2.2	Evolution comparée du centre thermique de trois étangs	319
CHAPITRE 8 : UNE APPROCHE GEOLIMNOLOGIQUE DE LA GESTION DES ETANGS.....		330
8.1	LA COMPOSANTE SPATIALE PEUT-ELLE APPORTER DES ELEMENTS DANS LA GESTION DE L'ÉTANG POUR SA PRESERVATION ET LA REDUCTION DE LEUR INCIDENCE SUR LE MILIEU AVAL RECEPTEUR ?	330
8.1.1	L'apport de l'analyse spatiale dans la typologie des étangs en vue de leur gestion	330
8.1.1.1	L'effet d'ombrage : un bénéfice de réduction thermique pour les étangs de faible superficie	331
8.1.1.2	Le choix stratégique de localisation et type de sortie d'eau pour les grands étangs	332
8.1.2	L'utilisation du centre thermique dans une optique de réduction du risque aval	335
8.1.2.1	Une anticipation de l'évolution du centre thermique selon les conditions météorologiques	335
8.1.2.2	Une efficacité de prévision du risque aval dépendante du type de sortie d'eau	339
8.1.3	Quelle gestion adopter pour ces plans d'eau lorsque l'on peut choisir la profondeur de sortie d'eau ?	342
8.1.4	Les étangs peuvent-ils abriter des espèces thermo-sensibles ?	344
8.2	LA VARIABLE SPATIALE COMME ELEMENT DE DISSOCIATION DES MASSES D'EAU.....	348
8.2.1	Quel est l'apport de la spatialisaton des données dans le monitoring environnemental ?.....	348
8.2.1.1	La variation de la transparence de l'eau	349
8.2.1.2	Variations de température.....	351
8.2.2	Le seuil surfacique de 50 ha recommandé par la DCE est-il l'élément déterminant dans la dissociation du fonctionnement interne des plans d'eau ?	353
8.2.2.1	L'élément surfacique est-il déterminant dans la dissociation des masses d'eau?.....	354
8.2.2.2	Le critère dominant de la profondeur dans la dissociation des masses d'eau	355
8.2.2.3	Le bilan thermique comme solution de dissociation des masses d'eau ?.....	356
8.2.2.4	Classification des étangs selon leur profondeur moyenne et leur bilan thermique	358
CONCLUSION GENERALE		363
BIBLIOGRAPHIE		371
ANNEXE		393
	ANNEXE 1 : RESUME LONG EN ANGLAIS.....	395
TABLES		413
	TABLES DES FIGURES	414
	TABLE DES PHOTOGRAPHIES	418
	TABLE DES TABLEAUX	418

Quentin CHOFFEL

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*)

Résumé : Les étangs sont des milieux aquatiques au cœur de problématiques environnementales dans les questions qualitatives et quantitatives de la ressource en eau. La température est un indicateur efficace dans ces mesures par sa réactivité et la capacité à se diffuser le plus en aval. L'étang est souvent considéré comme une boîte noire dans les études d'impact et la connaissance de son fonctionnement thermique devrait être le premier élément dans sa quantification. Dans cette étude, la prise en compte des volumes dans l'analyse thermique des 1 137 181 données thermiques horaires inédites, par le biais du bilan thermique, permet de mesurer et quantifier le fonctionnement global des étangs, distinct de celui des lacs. Le bilan thermique est un indicateur synthétique de l'ensemble des facteurs amenant et prélevant des calories au milieu et peut être utilisé dans son objectif premier de mesurer les échanges calorifiques au sein du plan d'eau et entre celui-ci et le milieu fluvial. L'hétérogénéité spatiale en étang dans l'aspect zonal, est influencée par l'effet de la force motrice du vent ou de l'environnement immédiat, la présence d'ombrage ou d'apports hydrologiques localisés. Un nouvel indicateur, le centre thermique, a été créé, prenant en compte les variations en trois dimensions du bilan thermique, de la stratification et la stabilité de plusieurs secteurs de l'étang afin de quantifier la dissociation des masses d'eau au sein du plan d'eau. L'intégration de la zonation thermique permet d'ouvrir de nouvelles perspectives de gestion afin de limiter l'impact thermique de l'étang à l'aval ou favoriser le développement de certaines espèces piscicoles thermosensibles. A partir de données météorologiques il est possible d'anticiper les zones d'expansion de chaleur dont les écarts peuvent être conséquents, mesurés à plus de 3°C sur un très petit étang lié à l'effet d'ombrage, ou encore à plus de 10 °C entre deux secteurs d'un grand étang multilobé sous l'influence des vents.

Mots clés : Géographie, limnologie, température de l'eau, bilan thermique, centre thermique

The differentiation of water masses within the pond :

thermal stratification, temperature zonation, heat budget and heat center
(*Limousin and Vosges ponds, international comparisons*)

Abstract : Ponds are at the heart of environmental issues in terms of quality and quantity of water resources. Temperature is an effective indicator in these measurements because of its reactivity and the ability to diffuse the most downstream. The pond is often considered as a black box in studies and the knowledge of its thermal functioning should be the first element in its quantification. In this study, the inclusion of volumes in the thermal analysis of the 1,137,181 original hourly thermal data, through the heat budget, allows to measure and quantify the whole behavior of the ponds, distinct from that of the lakes. The heat budget is a synthetic indicator of all the factors that bring and extract calories from the environment and can be used in its primary objective to measure calorific exchanges within the water body and between the water body and the river environment. The spatial heterogeneity in the zonal aspect of the pond is influenced by the effect of the driving force of the wind or the surrounding environment, the presence of shade or hydrological inputs. A new indicator, the heat center, has been created, taking into account three-dimensional variations in the heat balance, stratification and stability of several areas of the pond in order to quantify the dissociation of water masses within the water body. The integration of thermal zoning opens up new management opportunities to reduce the thermal impact of the pond downstream or to promote the development of certain heat-sensitive fish species. From meteorological data it is possible to anticipate areas of heat expansion whose differences can be significant, measured at more than 3°C on a very small pond related to the shading effect, or at more than 10°C between two sectors of a large multi-block pond under the influence of winds.

Key words : Geography, limnology, water temperature, heat budget, heat center



Laboratoire CEDETE , EA 1210
10 rue de Tours – BP 46527
45065 ORLEANS CEDEX 2

