



HAL
open science

La nature des retenues de seuil : une question limnologique ? Étude hydrodynamique, thermique et sédimentaire (Loiret, Moselle, Mayenne).

Francesco Donati

► To cite this version:

Francesco Donati. La nature des retenues de seuil : une question limnologique ? Étude hydrodynamique, thermique et sédimentaire (Loiret, Moselle, Mayenne).. Géographie. Université d'Orléans, 2021. Français. NNT : 2021ORLE3126 . tel-03629174

HAL Id: tel-03629174

<https://theses.hal.science/tel-03629174v1>

Submitted on 4 Apr 2022

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

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



UNIVERSITÉ D'ORLÉANS
ÉCOLE DOCTORALE SCIENCE DE LA SOCIÉTÉ TERRITOIRE,
ÉCONOMIE, DROIT

LABORATOIRE CEDETE

THÈSE présentée par :
Francesco DONATI

Soutenue le : **12/07/2021**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université d'Orléans**
Discipline/ Spécialité : Géographie - Aménagement – Environnement

La nature des retenues de seuil :
une question limnologique ?
Étude hydrodynamique, thermique et sédimentaire
(Loiret, Moselle, Mayenne)

THÈSE dirigée par :

M. TOUCHART Laurent
M. BARTOUT Pascal

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

RAPPORTEURS :

M. DUFOUR Simon (Président)
M. SALVADOR Pierre-Gil

Maître de conférences HDR, Université de Rennes 2
Professeur des Universités, Université de Lille

JURY :

Mme ZAHARIA Liliana
Mme BORMANS Myriam
M. ROLLO Nicolas

Professeure des Universités, Université de Bucarest
Directrice de recherche, Université de Rennes
Maître de conférences, Université de Nantes

AVANT-PROPOS

Dans une période historique où cela semble être quelque chose de révolutionnaire, j'ai décidé d'étudier ou mieux de continuer à étudier, affrontant le plus haut niveau d'étude : le doctorat. Lisant cette phrase, beaucoup de ceux qui me connaissent diront qu'elle ne peut pas avoir été écrite par Francesco, ce jeune garçon qui est monté sur le premier avion qui lui donnait la possibilité de fuir une certaine Géographie qu'il faisait au cours de ses deux premières années d'université et que ce n'était pas du tout son truc. Pourtant oui, c'est bien moi qui l'ai écrite et je veux profiter de ce petit espace qui m'est accordé pour remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à franchir cette importante ligne d'arrivée.

Un grand, grand, grand merci va à Laurent Touchart et Pascal Bartout. Merci de m'avoir transmis vos savoirs limnologiques et d'avoir partagé avec moi votre vision de la nature d'aujourd'hui. Merci pour votre disponibilité et patience à corriger mes erreurs scientifiques et grammaticales : vous m'avez beaucoup appris au cours de ces années, humainement et professionnellement ! Des nouveaux horizons s'ouvrent maintenant pour moi et j'espère, de tout cœur, que vous puissiez en faire partie : dans tous les cas, sachez que je vous porterai toujours dans mon esprit.

Merci aux rapporteurs de cette thèse de doctorat, M. Simon Dufour et M. Pierre-Gil Salvador, ainsi qu'aux examinateurs, Mme Myriam Bormans, Mme Liliana Zaharia et M. Rollo. Merci beaucoup d'avoir accepté de faire partie de ce parcours que j'ai entamé et pour vos contributions.

Merci à mon aimée Maria. Tu as été la roche à laquelle s'accrocher pendant les moments les plus difficiles de la thèse, tu as été en première ligne face aux changements d'humeur que ce type de travail peut engendrer et que mon mauvais caractère a sans doute empiré. Merci de m'avoir aidé, pendant tes jours de repos, dans les campagnes de terrain les plus difficiles : sans toi je serai encore en train de monter la station météo au moulin de Thévalles. Qui dit Maria, dit Mango et Meiko auxquels va une grosse papouille : au cours de cette période de pandémie et confinement, vous avez été mes véritables collègues...à quatre pattes !

Merci à mes parents et à ma famille. La vie nous a éloigné géographiquement, mais malgré ça vous avez été toujours présents au cours de ces années de thèse. J'aime penser que tout ce que vous avez fait pour moi m'a amené ici. J'espère que vous êtes fier de moi, moi je suis fier de vous et je vous suis très reconnaissant !

Merci à Catherine Petit, ma « maman française », sans laquelle jamais j'aurais terminé mes études. Merci de m'avoir appris le français et surtout de l'avoir corrigé. Tu te rappelles ce que je te disais à propos de la fac quand j'ai débarqué en France ? Finalement, c'est toi qui avais raisons...

Merci à Quentin Choffel, compagnon de milles aventures. Nous en aurons vues et faites de belles au cours de ces années de thèse : Baerenthal, la Pologne, l'Estonie, l'Italie, Rohrbach-lès-Bitche, etc. etc. Et combien encore nous en verrons, grâce à cette nouvelle aventure que nous venons de commencer et qui s'appelle Ecolimneau.

Merci à Simon Caillez, autre compagnon de milles aventures : avec toi aussi j'en ai vu des belles et j'espère, dans le futur, d'en voir d'autres encore ! Et, comme on dit chez moi, vu qu'il n'y a pas deux sans trois, merci aussi à Alban Cairault, troisième compagnon d'aventures dans les Vosges du Nord, berceau de ma vie de chercheur.

Merci à tous ceux et celles qui ont gravité, à un moment et à un autre, autour de ce parcours que je viens de terminer. Je ne peux pas vous citer tous, mais sachez que je vous suis très reconnaissant !

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GENERALE.....	17
I^{ère} PARTIE : LES CARACTERISTIQUES ABIOTIQUES DES MILIEUX AQUATIQUES CONTINENTAUX.....	27
INTRODUCTION À LA PREMIÈRE PARTIE.....	29
1. LES MILIEUX LOTIQUES.....	31
1.1 Le fonctionnement hydrodynamique des milieux lotiques.....	31
1.1.1 <i>Les causes à la base de l'écoulement unidirectionnel des cours d'eau</i>	32
1.1.2 <i>Les forces qui s'opposent à l'écoulement unidirectionnel des cours d'eau</i>	33
1.1.3 <i>La modalité d'écoulement des eaux et leur énergie</i>	34
1.2 Le fonctionnement sédimentaire des milieux lotiques	37
1.2.1 <i>Les différents types de charge sédimentaire des cours d'eau et leurs caractéristiques</i>	37
1.2.2 <i>La mobilisation de la charge sédimentaire de la part de l'écoulement des cours d'eau</i>	39
1.2.3 <i>Les modalités de déplacement de la charge sédimentaire des cours d'eau</i>	41
1.3 Les caractéristiques thermiques des cours d'eau	42
1.3.1 <i>Les facteurs qui déterminent la température des cours d'eau</i>	43
1.3.2 <i>Les variations temporelles de la température des cours d'eau</i>	44
1.3.3 <i>Les variations spatiales de la température des cours d'eau</i>	46
2. LES MILIEUX LENTIQUES	48
2.1 Le fonctionnement thermique des milieux lentiques.....	49
2.1.1 <i>Le rapport entre la température et la densité de l'eau</i>	49
2.1.2 <i>Les différents types de stratification thermique de la colonne d'eau d'un plan d'eau</i> ..	50
2.1.3 <i>Les facteurs qui régissent la stratification thermique dans les plans d'eau</i>	52

2.1.4	<i>Le fonctionnement thermique des étangs en contexte tempéré.....</i>	53
2.2	<i>Le fonctionnement hydrodynamique des milieux lenticques.....</i>	54
2.2.1	<i>L'annulation de l'écoulement du tributaire.....</i>	54
2.2.2	<i>Les forces à la base des processus limnologiques et la zonation spatiale des retenues.....</i>	56
2.2.3	<i>Les mécanismes de mobilisation des eaux au sein des plans d'eau.....</i>	59
2.2.4	<i>Les flux d'eau des plans d'eau : les courants.....</i>	60
2.2.5	<i>Les courants dans les petites retenues.....</i>	61
2.3	<i>Le fonctionnement sédimentaire des milieux lenticques.....</i>	63
2.3.1	<i>L'origine des sédiments des plans d'eau.....</i>	63
2.3.2	<i>La dynamique sédimentaire des plans d'eau.....</i>	63
2.3.3	<i>La dynamique sédimentaire dans les petites retenues.....</i>	65
3.	LES MILIEUX AQUATIQUES HYBRIDES	68
3.1	<i>Les écotones</i>	68
3.1.1	<i>Le gradient environnemental.....</i>	69
3.1.2	<i>La complexe géographie des écotones</i>	69
3.2	<i>Les écotones qui se développent le long des axes transversaux et verticaux des cours d'eau.....</i>	70
3.2.1	<i>Les écotones qui se développent le long de l'axe transversal d'un cours d'eau.....</i>	71
3.2.2	<i>Les écotones qui se développent le long de l'axe vertical d'un cours d'eau.....</i>	73
3.3	<i>Les écotones qui se développent le long de l'axe longitudinal d'un cours d'eau</i>	73
3.3.1	<i>L'écotone cours d'eau</i>	73
3.3.2	<i>Les estuaires.....</i>	74

3.3.3 Les mouilles.....	77
CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE.....	79
II^{ème} PARTIE : L'ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES ABIOTIQUES DE TROIS RETENUES DE SEUIL.....	82
INTRODUCTION À LA DEUXIÈME PARTIE.....	84
1. LA MÉTHODOLOGIE UTILISÉE POUR ÉTUDIER LES CARACTÉRISTIQUES ABIOTIQUES DES RETENUES DE SEUIL	86
1.1 Les techniques utilisées pour étudier le fonctionnement thermique d'une retenue de seuil.....	87
1.1.1 Les chaîne de thermomètres	87
1.1.2 Le traitement des données thermiques collectées par les chaînes de thermomètres.....	89
1.2 Les techniques utilisées pour étudier le fonctionnement hydrodynamique d'une retenue de seuil.....	89
1.2.1 Le courantomètre « FlowTracker 2 ».....	90
1.2.2 Méthodologie d'échantillonnage des caractéristiques hydrodynamiques d'une retenue de seuil.....	91
1.2.3 L'analyse des données hydrodynamiques.....	92
1.3 Les techniques utilisées pour étudier le fonctionnement sédimentaire d'une retenue de seuil.....	95
1.3.1 Les techniques utilisées pour étudier l'épaisseur de la strate de sédiments et prélever des échantillons de sédiments du fond des retenues de seuil	95
1.3.2 Le traitement des données sédimentaire.....	97
2. LES RETENUES DE SEUIL ÉTUDIÉES AU COURS DE LA RECHERCHE	100
2.1 La retenue de seuil de Saint-Hilaire	101

2.1.1	<i>Les caractéristiques du seuil en rivière de Saint-Hilaire</i>	102
2.1.2	<i>Les caractéristiques de la retenue de seuil de Saint-Hilaire</i>	104
2.1.3	<i>L'application de la méthodologie dans la retenue de seuil de Saint-Hilaire</i>	108
2.2	La retenue de seuil de Baerenthal.....	109
2.2.1	<i>Les caractéristiques du seuil en rivière de Baerenthal</i>	109
2.2.2	<i>Les caractéristiques de la retenue de seuil de Baerenthal</i>	110
2.2.2	<i>L'application de la méthodologie dans la retenue de seuil de Baerenthal</i>	114
2.3	La retenue de seuil de Thévalles.....	114
2.3.1	<i>Les caractéristiques du seuil en rivière de Thévalles</i>	117
2.3.2	<i>Les caractéristiques de la retenue de seuil de Thévalles</i>	117
2.3.3	<i>L'application de la méthodologie dans la retenue de seuil de Thévalles</i>	119
3.	LES RÉSULTATS OBTENUS DANS LES TROIS RETENUES DE SEUIL EN ÉTUDE	1242
3.1	Les résultats obtenus à l'amont de la retenue de seuil de Saint-Hilaire, archétype d'une retenue de seuil par un ouvrage de faible hauteur (0,5 m)	125
3.1.1	<i>Les résultats de l'étude thermique</i>	126
3.1.2	<i>Les résultats de l'étude hydrodynamique</i>	133
3.1.3	<i>Les résultats de l'étude sédimentaire</i>	135
3.2	Les résultats obtenus à l'amont de la retenue de seuil de Baerenthal, archétype d'une retenue de seuil formée par un ouvrage de taille moyenne (1 m)	140
3.2.1	<i>Les résultats de l'étude thermique</i>	141
3.2.2	<i>Les résultats de l'étude hydrodynamique</i>	148
3.2.3	<i>Les résultats de l'étude sédimentaire</i>	150

3.3 Les résultats obtenus dans la retenue de seuil de Thévalles, formée par un seuil de 2 m de hauteur.....	153
3.3.1 <i>Les résultats de l'étude thermique</i>	154
3.3.2 <i>Les résultats de l'étude hydrodynamique</i>	166
3.3.3 <i>Les résultats de l'étude sédimentaire</i>	166
CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE.....	168
III^{ème} PARTIE : COMMENT DOIT ON APPRÉHENDER LE FONCTIONNEMENT DES RETENUES DE SEUIL ?	168
INTRODUCTION À LA TROISIÈME PARTIE	173
1. LE FONCTIONNEMENT DES TROIS SEUILS EN RIVIÈRE.....	174
1.1 Le fonctionnement des retenues de seuil de Saint-Hilaire et Baerenthal	174
1.1.1 <i>Une hybridité thermique ?</i>	174
1.1.2 <i>Une hybridité hydrodynamique ?</i>	176
1.1.3 <i>Le fonctionnement sédimentaire des retenues des seuils d Saint-Hilaire et Baerenthal</i>	178
1.2 Le fonctionnement de la retenue de seuil de Thévalles.....	179
1.2.1 <i>Une hybridité thermique ?</i>	180
1.2.2 <i>Une hybridité hydrodynamique ?</i>	181
1.2.3 <i>Une hybridité sédimentaire ?</i>	182
1.3 La nature des retenues de seuil et les phénomènes qui la déterminent.....	183
1.3.1 <i>Le temps de séjours des eaux</i>	185
1.3.2 <i>La profondeur et le volume</i>	185
1.3.3 <i>La forme de la retenue de seuil</i>	186
2. LES RETENUES DE SEUIL : DES ÉCOTONES ANTHROPIQUES.....	187

2.1 Des écotones artificiels le long de la quatrième dimension des hydrosystèmes.....	187
2.1.1 <i>La colonisation humaine des hydrosystèmes</i>	187
2.1.2 <i>L'hybridité des hydrosystèmes contemporains</i>	189
2.1.3 <i>Les retenues de seuil comme des écotones artificiels</i>	190
2.2 L'écotone retenue de seuil et sa place au sein des milieux aquatiques continentaux.....	192
2.2.1 <i>Le fonctionnement de l'écotone retenue de seuil : le plus bas échelon de lenticité</i>	193
2.2.2 <i>Les échelons supérieurs de lenticité : les étangs et les lacs de barrage</i>	198
2.2.3 <i>Les écotones artificiels et milieux aquatiques naturels</i>	199
CONCLUSION DE LA TROISIÈME PARTIE	202
CONCLUSIONS GENERALES	201
BIBLIOGRAPHIE	208
TABLES	225

INTRODUCTION GÉNÉRALE

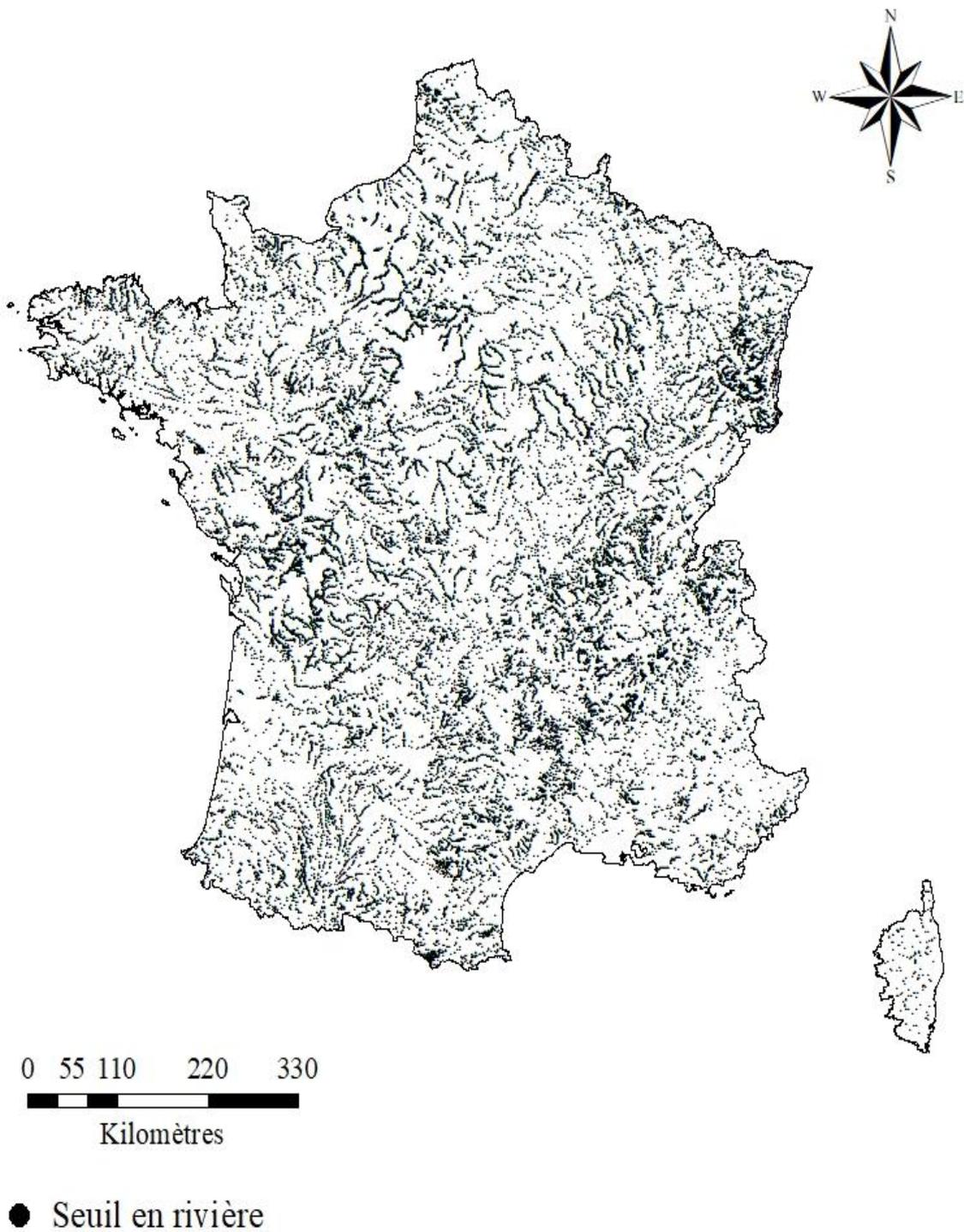
LA PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE

Les seuils en rivière sont des petits ouvrages hydrauliques situés dans le lit mineur d'un cours d'eau, qu'ils barrent totalement dans le sens de la largeur et partiellement dans le sens de la hauteur (Degoutte, 2012). Ils peuvent être construits de plusieurs types de matériaux et se présenter avec une multitude de configurations différentes : les seuils à crête large, les seuils à crête étroite, les seuils à crête pointue, les seuils trapézoïdaux, les seuils en voûte, les seuils en marches, les seuils amovibles et les seuils équipés avec éléments mobiles¹ (Rickard et al., 2003). Leur but est de rehausser la ligne d'eau du cours d'eau dans lesquels ils sont bâtis, afin de pouvoir dériver les eaux dans un chenal, actionner une turbine, alimenter une station de pompage, créer des zones d'eau calme ou stabiliser son profil longitudinal (Degoutte, 2012 ; Recking et al., 2013). Contrairement à d'autres ouvrages hydrauliques transversaux à l'écoulement d'un cours d'eau, les seuils en rivière n'amènent pas à la formation d'un plan d'eau à leur amont, les eaux étant libres de s'écouler, mais à la création d'une zone caractérisée par une profondeur plus importante et une vitesse de l'écoulement plus faible (Fencl et al., 2015). À la suite de Malavoi (2003), tout au long de cet ouvrage, nous nommerons cet espace « retenue de seuil ».

Les seuils en rivière sont des éléments très récurrents dans les cours d'eau de certains pays et la France métropolitaine en est un parfait exemple avec ses cinquante mille unités (Sandre, 2017) (fig. 1). À partir du Moyen-Âge, les fleuves et les rivières qui sillonnent ce territoire ont été aménagés massivement avec ce type d'ouvrages hydrauliques, initialement pour le fonctionnement des roues des moulins à eau ou pour l'alimentation des chenaux agricoles, ensuite pour contrôler la charge sédimentaire qui s'accumulait dans les fleuves gênant la navigation et pour finir pour compenser les importants dégâts des extractions des sédiments effectuées directement dans les lits mineurs des rivières au cours du XX^{ème} siècle (Bravard, 2018). Toutefois, au fil du temps ces anciens usages ont été progressivement délaissés ou réalisés avec des techniques plus performantes, rendant les seuils obsolètes au fur et à mesure des progrès technologiques. De nos jours, la plupart de ces constructions continuent à pointiller les paysages fluviaux français, mais elles demeurent à l'abandon.

¹ Ces termes qui désignent les différents types de seuil en rivière ont été traduits de l'anglais. Dans l'ordre, les termes d'origine : board crested, straight drop, sharp crested, crump, ogee, stepped, tilting et gated. On rappelle que dans cette langue le mot utilisé pour nommer les seuils en rivière est « weir ».

LES SEUILS EN RIVIÈRE EN FRANCE MÉTROPOLITAINE



Réalisation : Francesco Donati (Source : eaufrance).

Figure 1 : Les seuils en rivière en France métropolitaine (Réalisation : Francesco Donati).

Si dans le passé ils étaient le centre de la vie industrielle, économique, culturelle et sociale du pays (Barraud et al., 2013 ; Rivals, 2000), aujourd'hui les seuils en rivière semblent être devenus un problème pour les gestionnaires français des milieux aquatiques, en raison des impacts qu'ils exerceraient sur les fleuves et les rivières. Pour cette raison, une politique de suppression de ces ouvrages a démarré au cours des dernières décennies, supportée par un contexte institutionnel et législatif favorable au « Dam removal », qui a fait de cette pratique une mesure phare des programmes de restauration écologique des cours d'eau (Germaine & Barraud, 2017). Parmi les effets négatifs que les seuils en rivière provoqueraient, il y a la transformation des eaux courantes en eaux stagnantes et le conséquent changement de fonctionnement du milieu, qui de lotique deviendrait lentique. Cet argument est omniprésent dans les documents des organismes français chargés de la gestion des milieux aquatiques et dans les discussions publiques relatives aux seuils en rivière. Voici quelques exemples :

- Dans le document « Stratégie d'intervention de l'Agence de l'Eau sur les seuils en rivière » (rédigé par Malavoi en 2003, pour l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne), on lit que les seuils en rivière ont un « *effet plan d'eau* » à leur amont et que le calage hydraulique qu'ils provoquent « *génère des faciès chenal lentique ou plat lentique sur des secteurs où ils ne devraient pas se développer ou du moins pas sur un linéaire aussi important* ».
- Dans le document « Arasement et dérasement de seuils - Aide à la définition de cahier des charges pour les études de faisabilité » (rédigé par Malavoi & Salgues en 2011, pour l'Onema et le Cemagref), on lit que « *les seuils et barrages engendrent à leur amont un remous liquide plus ou moins long à l'origine de faciès d'écoulement lenticques et profonds en lieu et place des séquences naturelles de faciès, naturellement diversifiées. Au niveau biologique, on observe généralement un remplacement des biocénoses naturelles par des biocénoses inféodées aux courants lents et aux fortes profondeurs* ». On lit également que « *l'augmentation des profondeurs et la réduction des vitesses dans la retenue (de seuil) créées par l'ouvrage se traduisent le plus souvent par une modification du peuplement autochtone : seules les espèces mieux adaptées aux températures plus élevées et au milieu lentique se maintiennent* ».
- Dans le document « Barrages et seuils : principaux impacts environnementaux » (rédigé par Souchon & Nicolas en 2011, pour l'Onema et le Cemagref), on lit que « *du fait des modifications d'habitats générées par l'implantation d'un ouvrage,*

l'écosystème connaît une transformation, et souvent les espèces en place sont également modifiées. On assiste ainsi progressivement à une multiplication d'habitats lenticques, au cortège d'espèces réduit et à une banalisation progressive de la biodiversité ». Cela engendrerait des « *risques éventuels de stratification thermique, d'accumulation de sédiments et d'enrichissement en nutriments* ».

- En 2019, le Secrétaire d'État auprès du ministre de la Transition écologique et solidaire de l'époque (Mme Emmanuelle Wargon) affirma au cours d'une discussion au sujet des microcentrales hydroélectriques au Sénat que « *les seuils fragmentent les cours d'eau, empêchant plus ou moins fortement le déplacement des espèces nécessaire à l'accomplissement de leur cycle de vie. Ils peuvent en outre ralentir les eaux, qui se réchauffent alors plus vite l'été, perdent de l'oxygène et créent des habitats de milieux stagnants favorisant des espèces incompatibles avec le bon état des cours d'eau* »².

« *Et pourtant elle bouge...* » aurait marmonné l'astronome italien Galilée après que l'Inquisition l'eut forcé d'abjurer sa théorie héliocentrique et ainsi doutent les propriétaires des seuils en rivière visés par les effacements ou les simples riverains quand ils observent l'eau d'une retenue de seuil. Creusant plus profondément la question on se rend compte que leurs doutes sont loin d'être infondés. En effet, contrairement à d'autres types de retenues dont le fonctionnement a été étudié dans les détails au cours des années passées (Oertli & Frossard, 2014 ; Petts, 1984 ; Straskraba et al., 2013 ; Tanase & Zaharia, 2015 ; Thornton et al., 1990 ; Touchart, 2016 ; Touchart & Bartout, 2010), les caractéristiques des retenues de seuil n'ont pratiquement jamais été examinées. Les rares recherches existantes à ce sujet ont été réalisées principalement dans des contextes environnementaux difficilement comparables avec ceux de la France métropolitaine, comme le contexte australien ou celui nord-américain (*e.g.* Bormans et al., 1997 ; Bormans & Webster, 1998 ; Csiki & Rhoads, 2014 ; Csiki & Rhoads, 2010 ; Engel & Fischer, 2017 ; Fencl et al., 2015 ; Turner & Erskine, 1997 ; Webster et al., 1997 ; Whiterod & Sherman, 2012) De ce fait, il paraît imprudent d'assimiler le fonctionnement des retenues de seuil à celui des lacs de barrages et des étangs, dont le fonctionnement semble être totalement différent de celui de seuils en rivière, bien qu'ils partagent certains points en commun, comme le fait de se situer transversalement à l'écoulement d'un cours d'eau.

² À partir du lien suivant, il est possible de trouver la transcription complète de cet échange : <https://www.senat.fr/questions/base/2019/qSEQ19070861S.html>

L'OBJECTIF ET LES ENJEUX DE LA THÈSE

Qu'en est-il donc ? Les seuils en rivière transforment-ils les milieux lotiques en milieux lenticques, créant des retenues de seuil qui fonctionnent comme des plans d'eau ? L'objectif de cette thèse de doctorat est de tenter d'apporter une réponse à cette question et combler ainsi le vide qui existe dans la littérature scientifique à ce sujet, à travers l'étude de plusieurs retenues de seuil situées en France métropolitaine. Notre hypothèse de départ est qu'effectivement ces ouvrages hydrauliques créent des milieux lenticques à leur amont, comme les barrages ou les chaussées d'étang le font. L'étude se focalisera uniquement sur le biotope des retenues de seuil et plus précisément sur l'analyse de trois compartiments abiotiques : celui hydrodynamique, celui sédimentaire et celui thermique. Ils jouent un rôle très important dans la structuration des habitats aquatiques et pour les espèces qui les peuplent, mais surtout ils fonctionnent de manière différente dans les environnements d'eau courante et dans ceux d'eau stagnante. Pour cette raison, l'analyse de leur aspect permet d'établir à quel type de milieu aquatique appartiennent les retenues de seuil.

Les différents terrains d'étude seront étudiés avec le même regard et avec les mêmes techniques utilisées dans les études limnologiques. En effet, cette recherche se positionne principalement dans le domaine de la Limnologie, la discipline qui étudie les milieux d'eau stagnante, en conséquence celle qui possède les instruments théoriques et pratiques les plus adaptés pour répondre à notre hypothèse. Toutefois, pour apporter une réponse à la problématique il sera nécessaire de « se mouiller » dans la Potamologie, la discipline qui étudie les milieux d'eau courante, afin d'établir la magnitude des perturbations que les seuils en rivière imposeraient aux cours d'eau. Ainsi, cette recherche se veut être également une sorte d'étude « d'hydrologie comparée ».

Les enjeux sont importants. Si l'hypothèse est confirmée, en raison du grand nombre de seuils en rivière existant dans ce pays, cela signifierait que la plupart des espaces fluviaux français fonctionnent en réalité comme des milieux lenticques. Cela impliquerait un changement radical de la manière de considérer les fleuves et les rivières et de la façon de les gérer. Au contraire, si l'hypothèse est infirmée, cela signifierait qu'une partie des paradigmes sur lesquels se base l'actuelle politique française de gestion des cours d'eau sont erronés. Cela impliquerait une remise en cause des actions menées jusqu'à aujourd'hui et la recherche de nouvelles stratégies d'administration des cours d'eau.

LA STRUCTURATION DE LA THÈSE

Dans le souci d'illustrer le plus clairement possible les concepts scientifiques de base, les techniques utilisées et les résultats obtenus, ce travail s'organisera en trois parties, composées de plusieurs chapitres :

- I. La première partie sera dédiée aux différences qui séparent les fonctionnements hydrodynamique, sédimentaire et thermique des milieux lotiques et des milieux lenticques de manière générale puis, par changement d'échelle, en montrant la non-uniformité interne de ces objets. Cette approche questionnera l'hybridité hydrologique. Dans un premier chapitre, nous nous concentrerons sur les cours d'eau, afin de comprendre comment les trois compartiments abiotiques en étude fonctionnent quand ils ne sont pas perturbés, c'est-à-dire comment ils se présentent dans des conditions naturelles. Dans un deuxième chapitre, nous nous concentrerons sur les plans d'eau, afin de comprendre comment ces compartiments abiotiques devraient se comporter si effectivement les seuils en rivière imprimaient un fonctionnement lentique au milieu. Dans un troisième chapitre, par changement d'échelle géographique d'appréhension du sujet, nous nous concentrerons sur la thématique des écotones et plus particulièrement ceux dont nous avons connaissance au sein des hydrosystèmes pour cerner la nature changeante et mal définie de ces milieux. Un résumé des concepts fondamentaux abordés dans cette première partie a été publié dans l'article « Anciens et nouveaux écosystèmes aquatiques : une revue sur leur fonctionnement abiotique » (Donati et al., 2021) que nous avons rédigé.
- II. La deuxième partie sera dédiée aux aspects pratiques de la recherche, c'est-à-dire aux procédés qui ont été déployés, les sites où ceux-ci ont été mis en pratique et les résultats obtenus. Dans un premier chapitre, nous présenterons la méthodologie et les instruments utilisés pour collecter les données nécessaires pour apporter une réponse à la problématique ; au cours de ce chapitre sera également traitée la manière dont les données ont été analysées après avoir été collectées. Dans un deuxième chapitre, nous présenterons les terrains d'étude où ces techniques ont été appliquées et nous aborderons les aspects qui les rendent pertinents pour cette étude. Dans un troisième chapitre nous présenterons les résultats obtenus dans chaque terrain d'étude, tout en questionnant leur représentativité scientifique par de nombreuses illustrations. Un résumé de la méthodologie que nous avons utilisé et des résultats

que nous avons obtenus a été publié dans les articles « Do rivers upstream weirs have lotics or lentic characteristics ? » (Donati et al., 2019) et « Les seuils en rivière transforment-ils les milieux lotiques en milieux lenticques ? » (Donati et al., 2020) que nous avons rédigé.

- III. La troisième et dernière partie de ce manuscrit permettra une prise d' hauteur vis-à-vis des résultats obtenus et sur la problématique qui anime ce travail de recherche. Dans un premier chapitre, les résultats brutes présentés dans la partie d' avant seront interprétés, afin de mettre en avant les éléments clés du fonctionnement des retenues de seuil en étude. Dans un deuxième chapitre, une réflexion plus approfondie sur les retenues de seuil et sur leur place au sein des environnements aquatiques continentaux sera réalisée. Au cours de cette réflexion seront pris en compte certains aspects historiques, afin d' avoir une vision plus proche de la réalité des bassins versants européens d' aujourd' hui, qui sont caractérisés par un fort niveau d' anthropisation. L' article « Anciens et nouveaux écosystèmes aquatiques : une revue sur leur fonctionnement abiotique » (Donati et al., 2021) que nous avons déjà mentionné plus haut, traite également de plusieurs aspects de cette dernière partie.

Dans une conclusion générale, sur la base de tous les aspects qui auront été analysés, l' hypothèse de départ trouvera une réponse. Cette dernière partie sera également l' occasion de mettre en place une réflexion concernant les perspectives que les résultats que nous avons obtenus ouvrent, en essayant de déterminer quelles pourraient être les suites scientifiques de ce travail de recherche.

I^{ÈRE} PARTIE :
LES CARACTÉRISTIQUES ABIOTIQUES DES MILIEUX
AQUATIQUES CONTINENTAUX

INTRODUCTION À LA PREMIÈRE PARTIE

Comme Germaine & Barraud (2017) l'expliquent, vers la fin du XX^{ème} siècle, les problématiques écologiques s'imposent dans le domaine de la gestion des cours d'eau. Elles incitent le développement de certaines pratiques de restauration écologique, qui visent à intervenir sur la structure des fleuves et des rivières, afin de recréer des conditions favorables au développement de la biodiversité. En Europe, à partir de l'année 2000, ce type de gestion des cours d'eau est en quelque sorte légitimé par la Directive Cadre sur l'Eau, qui jette les bases pour une gestion des milieux aquatiques à échelle européenne et qui promeut l'idée de rivière comme « infrastructure écologique ». La France, au cours de la transcription de cette normative dans son droit national, met en avant le concept de Continuité écologique, qui plaide pour la libre circulation des espèces et des sédiments aux sein des cours d'eau et qui déclenche une « course à l'effacement » de tout élément qui puisse l'entraver. Parmi eux il y a les ouvrages hydrauliques transversaux à l'écoulement des eaux, comme les barrages, les étangs ou les seuils en rivière, qui rendraient impossible la Continuité écologique et transformeraient radicalement la nature des cours d'eau. C'est dans ce contexte que naît la problématique de cette recherche, le conflit entre deux manières d'apercevoir l'effet des seuils en rivière qui existent au sein des réseaux hydrographiques de la France métropolitaine. D'un côté il y a ceux qui affirment que ces ouvrages transforment les cours d'eau en plans d'eau. Selon eux, cette modification est une implication inévitable de la présence de ce type de construction, à l'instar des grands aménagements hydroélectriques. Face à une retenue de seuil, ils exclament : « *Regardez : il n'y a pas de courant, ici la rivière est devenue un plan d'eau !* ». De l'autre côté, il y a ceux qui affirment que ces ouvrages ne transforment pas les cours d'eau en plans d'eau. Selon eux, cette modification n'a pas lieu et il est absurde de comparer les espaces qui se forment à l'amont d'un seuil en rivière à des eaux dormantes. Devant une retenue de seuil, ils font remarquer : « *Si elle est vraiment un plan d'eau, elle aurait déjà dû se combler au bout de plusieurs siècles d'existence...* »³. Le scientifique qui assiste à ce litige est appelé à réagir, avec l'impartialité, le recul et la rigueur qui caractérisent sa démarche de travail. Donc les questions qu'il se pose ne sont pas de savoir laquelle des deux parties a raison, mais quels sont les éléments qui permettent

³ Les deux phrases que nous reportons ici nous avons eu l'occasion d'entendre à plusieurs reprises au cours des trois années de thèse, pendant nos campagnes de terrain.

de différencier les environnements aquatiques d'eau courante et de ceux d'eau stagnante et est-ce que cette opposition lotique/lentique est réellement adaptée aux retenues de seuil.

Nous pensons alors que ce travail de recherche doit forcément débiter par une revue des différents milieux aquatiques continentaux et de leur fonctionnement, afin de pouvoir identifier quels sont les traits qui permettent de les distinguer. Ainsi, cette première partie se composera de trois chapitres :

- I. Le premier sera dédié aux milieux lotiques, c'est-à-dire aux milieux d'eau courante, les cours d'eau.
- II. Le deuxième sera dédié aux milieux lenticques, c'est-à-dire aux milieux d'eau stagnante, les plans d'eau.
- III. Le troisième sera dédié aux milieux hybrides, c'est-à-dire aux milieux dont les caractéristiques sont incertaines, présentant à la fois des traits lotiques et lenticques.

Au cours de la présentation de ces différents milieux, nous mettrons en avant leur fonctionnement abiotique et plus précisément celui des trois compartiments au centre de cette recherche : celui hydrodynamique, celui sédimentaire et celui thermique. Les informations qui ont servi pour la rédaction de ces deux chapitres ont été tirées d'un corpus de textes très diversifié et très consistant, qui comprend des manuels et des articles scientifiques écrits en français, en anglais et en italien. Dans le deuxième chapitre consacré aux milieux lenticques, nous avons décidé de concentrer notre attention non pas sur les grands lacs naturels ou les grands lacs de barrage, mais sur les étangs. En effet, comme on le verra mieux par la suite, le fonctionnement des plans d'eau change considérablement en fonction de leur taille et nous estimons que pour pouvoir répondre correctement à la problématique il convient d'utiliser comme référence ces petites retenues, qui présentent sans doute des conditions plus proches à celles des retenues de seuil et qui, elles aussi, sont artificielles. D'ailleurs, la réglementation actuellement en vigueur en France (DCE-2000, LEMA-2006) fait fi des étangs, en les intégrant aux « Masses d'Eau Cours d'Eau », alors que les lacs ont droit à des mesures spécifiques grâce à leur classement en « Masses d'Eau Plans d'Eau ». Dans une démarche purement géographique centrée sur les changements d'échelle, nous nous emparons de cette définition, qui nous autorisera à formuler des propositions fonctionnelles, qui ne dépendent pas d'une limite spatiale arbitraire.

1. LES MILIEUX LOTIQUES

Les précipitations qui tombent sur les continents peuvent connaître trois sorts différents : elles peuvent s'évaporer, s'infiltrer dans le sous-sol ou ruisseler le long des versants. Celles qui ne retournent pas à l'atmosphère finissent par alimenter un des réseaux hydrographiques qui drainent les continents et qui acheminent les eaux vers les océans, avec des périodes plus ou moins longues d'arrêt et de mise en réserve. Ils apparaissent comme un ensemble ramifié de lignes d'eau qui se rejoignent dans un segment unique : il s'agit des fleuves et des rivières ou, plus généralement, des milieux lotiques.

Ce type de milieu aquatique se développe à l'intérieur d'une vallée, dans un chenal naturel qui en suit la pente et qu'on appelle communément « lit ». Ses dimensions ne sont pas figées dans les temps, mais elles varient en fonction de la quantité d'eau qu'il abrite et dans la littérature scientifique on distingue habituellement quatre types de lits, emboîtés les uns dans les autres (Pardé, 1933 ; Tricart, 1960) :

- Le lit d'étiage, que les eaux occupent à l'occasion des débits les plus faibles et qui se situe à l'intérieur du lit mineur.
- Le lit mineur, que les eaux occupent à l'occasion des débits normaux et qui généralement est bien délimité à l'intérieur de deux berges.
- Le lit majeur périodique, que les eaux occupent à l'occasion des plus forts débits et qui commence immédiatement au-delà des berges qui délimitent le lit mineur.
- Le lit majeur exceptionnel, que les eaux occupent à l'occasion des débits extraordinaires et qui ne dépasse pas les limites de la vallée.

Quoi qu'il en soit de l'ampleur, les lits fluviaux sont dominés par leur longitudinalité, de sorte que tous les processus abiotiques et biotiques qui caractérisent ces environnements s'articulent le long de leur axe horizontal.

1.1 Le fonctionnement hydrodynamique des milieux lotiques

La manifestation la plus éclatante de l'articulation longitudinale des processus fluviaux concerne le déplacement de leurs eaux, qui se meuvent constamment dans la direction amont-aval. Celle-ci est sans doute la principale caractéristique des milieux lotiques, celle qui est à la base de tous les autres phénomènes qui les caractérisent.

1.1.1 Les causes à la base de l'écoulement unidirectionnel des cours d'eau

À l'origine de ce type d'écoulement il y a les lois de la Physique et notamment celles qui règlent la mécanique des fluides. Selon la « Loi fondamentale de l'équilibre des fluides », pour qu'un liquide soit en équilibre (c'est-à-dire immobile) il est nécessaire que sur celui-ci agissent des pressions égales qui le compriment dans toutes les directions (Bossut, 1775). Comme on peut le voir dans la figure 2, dans un cours d'eau cette condition ne peut pas s'appliquer en raison de la morphologie de son lit. En effet, la masse⁴ d'eau « e » contenue entre les parois du chenal (en vert dans la figure) est caractérisée par des pressions égales qui agissent dans toutes les directions, comme le Principe de Pascal⁵ l'affirme. Donc, celles exercées par les berges (\vec{p}_1 , \vec{p}_2) et par le fond (\vec{p}_3) du cours d'eau ne sont pas suffisantes pour équilibrer l'ensemble de ces pressions, laissant ainsi la masse d'eau en déséquilibre.

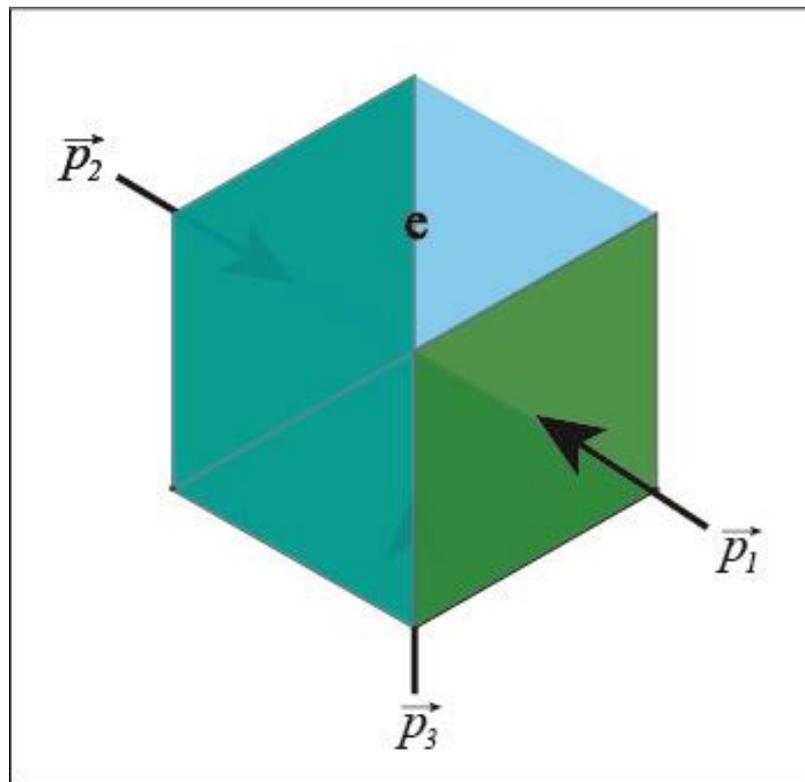


Figure 2 : Les pressions exercées par un lit fluvial sur la masse d'eau qu'il contient (Réalisation : Francesco Donati).

⁴ Dans ce cas nous utilisons le terme « masse » dans son acception purement physique, c'est-à-dire une grandeur physique que tout corps possède et qui en détermine la dynamique. Il n'est pas à confondre avec la masse d'eau DCE : quand nous l'utiliserons avec cette acception nous le spécifierons.

⁵ Le Principe de Pascal affirme que dans un liquide en équilibre la pression est la même en tout point du liquide tant que ces points se trouvent à la même profondeur. Il prend le nom du scientifique Blaise Pascal, qui l'a formulé en 1653 dans son ouvrage « *Traité de l'équilibre des liqueurs et de la pesanteur de la masse d'air* ».

Comme on peut le voir dans la figure 3, la situation de « e » peut alors être comparée à celle d'une bille sur un plan incliné, qui représente le versant sur lequel coule le cours d'eau. Comme tout objet sur Terre, la masse d'eau est soumise à la force de gravité (\vec{g}), qui peut être décomposée dans sa composante parallèle ($\vec{F}_{//}$) et perpendiculaire (\vec{F}_{\perp}) au terrain. L'action de \vec{F}_{\perp} est équilibrée par la force normale au versant (\vec{F}_n), c'est-à-dire la force exercée par le fond du lit (\vec{p}_3), leur magnitude étant égale et leurs directions opposées⁶. En revanche, aucune force n'intervient pour équilibrer $\vec{F}_{//}$, ce qui déclenche ainsi l'écoulement de la masse d'eau, comme le Principe d'inertie⁷ l'énonce (Halliday et al., 2004 ; Walker, 2014). Ainsi, en l'absence d'autres forces capables d'en dévier la direction, les eaux peuvent se déplacer uniquement dans la direction de la force qui origine leur mouvement, c'est-à-dire parallèlement au versant.

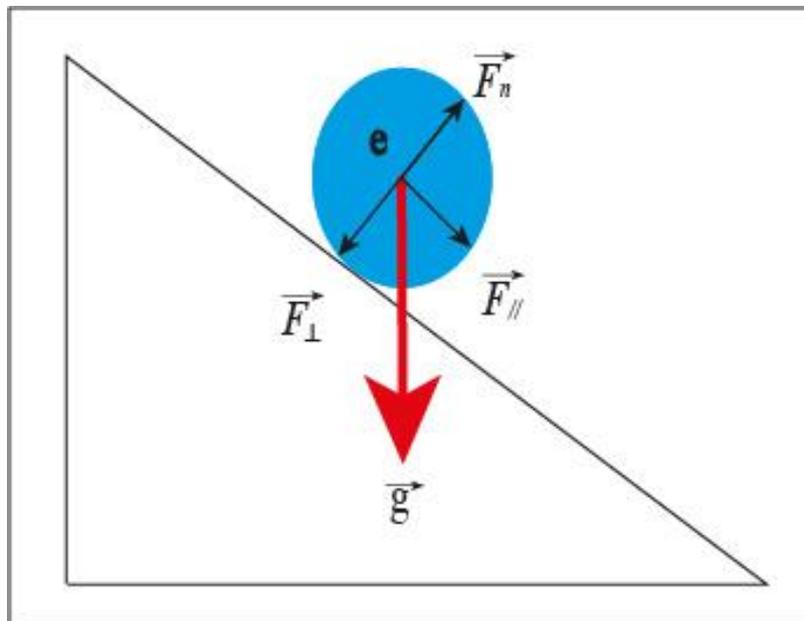


Figure 3 : Les forces qui déclenchent l'écoulement des eaux fluviales (Réalisation : Francesco Donati).

1.1.2 Les forces qui s'opposent à l'écoulement unidirectionnel des cours d'eau

Comme Charlton (2008) et Powell (2014) l'expliquent, la masse d'eau qui s'écoule dans les cours d'eau est également soumise à d'autres forces, qui au contraire tendent à l'arrêter :

⁶ On rappelle qu'en Physique les forces sont des éléments vectoriels, c'est-à-dire définis par une magnitude et une direction. En raison de ça, elles sont généralement indiquées avec une flèche sur le terme qui le désigne.

⁷ Le Principe d'inertie affirme que tout objet persévère dans l'état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme tant qu'aucune force n'agit sur lui. Il est également appelé Première loi de Newton, en honneur du physicien Isaac Newton qui l'a formulé en 1687 dans son ouvrage « *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* ».

celles de frottement et celles de viscosité. Le premier type de force dérive de la friction de l'eau contre le lit et sa magnitude dépend de la « rugosité » de ses parois. En Hydrologie ce terme décrit l'état des surfaces sur lesquelles coule l'eau, qui généralement présentent des aspérités qui rendent plus difficile l'écoulement. Plusieurs facteurs font varier ce paramètre, mais les plus influents sont la taille des matériaux qui composent le chenal et les formes qui lui sont associées⁸. En effet, la dimension des particules qui constituent le lit est directement proportionnelle au ralentissement qu'elles engendrent : plus elles sont grosses, plus grande est la résistance qu'elles opposent (Bathurst, 1993 ; Knighton, 1998) ; de même, certaines structures engendrent une résistance majeure au mouvement des eaux, comme les radiers ou les ondulations du chenal (Hey, 1988 ; Prestegard, 1983).

Le deuxième type de force dérive de la viscosité, c'est-à-dire de la résistance qu'un liquide oppose au mouvement à cause des liens très forts entre les molécules ou en raison de la taille de celles-ci (Arnaud, 2007). Sa magnitude varie en fonction de la température, car elle augmente quand le liquide est froid et s'affaiblit quand il est chaud : à titre d'exemple, la viscosité de l'eau à 0° est de 1,787 cp⁹, alors qu'à 100° elle est de 0,2818 cp (Weast, 1975). Dans les cours d'eau, les molécules d'eau se lient aux parois du chenal, qui leur transmettent leur propre vitesse (qui est nulle). Cette condition est appelée de non-glissement et elle engendre une force communément appelée de trainée¹⁰ qui s'oppose à l'écoulement (Dingman, 2009).

1.1.3 La modalité d'écoulement des eaux et leur énergie

De l'interaction entre les forces qui déclenchent l'écoulement et les forces qui tendent à l'arrêter dépend la modalité de déplacement des eaux au sein du lit. Quand on examine l'écoulement d'un cours d'eau on constate que sa vitesse n'est pas uniforme au sein du chenal, mais qu'elle varie du centre vers les berges et de la surface vers le fond. On retrouve les vitesses les plus fortes au milieu du lit et en surface, alors qu'on retrouve les plus faibles à proximité des parois du lit et en profondeur, où elles peuvent atteindre des valeurs proches de zéro (Charlton, 2008 ; Knighton, 1998). Ce phénomène résulte de l'action des forces de frottement et de viscosité, qui sont plus intenses au fur et à mesure qu'on se rapproche du chenal. La

⁸ D'autres facteurs qui peuvent influencer l'écoulement d'un cours d'eau sont la présence de végétation le long des berges ou le transport des sédiments.

⁹ Le sigle cp signifie centipoise ; le Poise est l'unité de mesure de la viscosité dynamique (Taillet et al., 2018).

¹⁰ En Physique, la force de trainée est celle qui agit sur un corps en mouvement dans un fluide, qui s'oppose au mouvement et agit comme un frottement (Taillet et al., 2018).

principale conséquence de ces gradients¹¹ de vitesse horizontaux et verticaux est l'apparition de turbulences au sein de la colonne d'eau (fig. 4) (Angelier, 2000). La turbulence est l'état d'un liquide dont les particules qui le composent se déplacent de façon chaotique et, dans un cours d'eau, elle se manifeste à travers des vortex quasi-circulaires qui se forment à proximité du lit. Si leur inertie est faible par rapport à la viscosité de l'eau, ils sont annulés et les particules d'eau se déplaceront parallèlement au sens de l'écoulement ; au contraire, si leur inertie est forte par rapport à la viscosité de l'eau, ils se propageront dans tout l'écoulement, induisant le déplacement chaotique des particules d'eau (Dingman, 2009). Ainsi, dans la littérature scientifique on a l'habitude de distinguer deux types d'écoulement :

- L'écoulement laminaire, dans lequel les filets d'eau se déplacent parallèlement au sens du chenal.
- L'écoulement turbulent, dans lequel les filets d'eau se déplacent de façon chaotique-tourbillonnaire.

Dans les cours d'eau l'écoulement est toujours turbulent, le laminaire étant très rare dans la nature et limité à certains types de milieux, par exemple les nappes phréatiques (Mount, 1995).

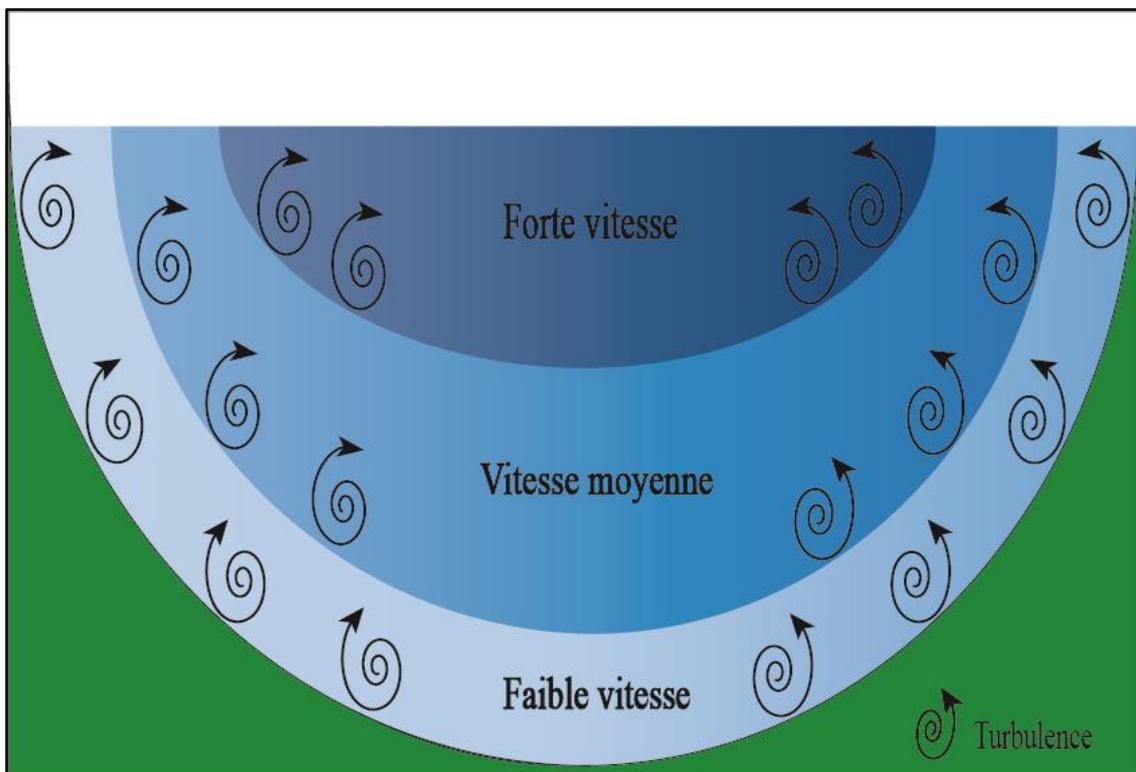


Figure 4 : La modalité d'écoulement des eaux au sein d'un chenal fluvial (Source : Francesco Donati).

¹¹ Un gradient est une variation spatiale continue d'une quantité physique (Taillet et al., 2018).

Des interactions entre la force de gravité et les forces de frottement dépend également l'énergie totale de l'écoulement (E_t). Elle résulte de la somme de plusieurs types d'énergies, comme on peut le voir grâce à l'équation de Bernoulli¹² :

$$E_t = \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z \quad [1.1]$$

Où $\frac{p}{\rho g}$ est l'énergie liée à la pression de l'eau (ρ est sa masse volumique), $\frac{v^2}{2g}$ est l'énergie cinétique de l'eau (v est sa vitesse) et z son énergie potentielle. Si on assume que l'énergie de la pression est une composante de l'énergie potentielle (Dingman, 2009), l'équation 1.1 peut alors être écrite comme suit :

$$E_t = \frac{v^2}{2g} + z \quad [1.2]$$

Tout au long de son trajet, la masse d'eau qui s'écoule dans un cours d'eau transforme son énergie potentielle en énergie cinétique : plus la pente du lit est importante, plus grande sera la vitesse de l'écoulement. La plupart de cette énergie, on l'estime à 95% de l'énergie totale du cours d'eau, est dissipée pour vaincre l'action des forces de frottement et celles de viscosité (Morisawa, 1968). On peut alors parler d'énergie nette du cours d'eau (E_n), c'est-à-dire celle qui reste à l'écoulement après s'être opposée aux forces qui en entravent le mouvement. Elle peut être calculée à travers l'équation suivante (Ciccacci, 2015 ; Panizza, 2014) :

$$E_n = E_t - E_d \quad [1.3]$$

Où E_d est la quantité d'énergie dissipée pour vaincre les forces de frottement et de viscosité. Plus grande est l'énergie nette de l'écoulement, plus celui-ci aura la capacité d'accomplir un travail, c'est-à-dire d'échanger son énergie avec d'autres corps présents dans le cours d'eau.

¹² Cette équation prend le nom du scientifique Daniel Bernoulli, qui l'a formulée en 1738 dans son ouvrage « *Hydrodynamica, sive de Viribus et Motibus Fluidorum commentarii* ».

1.2 Le fonctionnement sédimentaire des milieux lotiques

Un exemple de travail accompli par l'écoulement d'un cours d'eau est le flux des sédiments qu'il mobilise. En effet, le mouvement unidirectionnel des eaux se transmet aux matériaux qu'elles rencontrent le long de leur trajet, permettant au liquide d'évacuer une charge sédimentaire au sein du lit. Ce phénomène est très important, car il modèle l'habitat des organismes qui peuplent les cours d'eau, dont la plupart sont de type benthique¹³. En outre, la chaîne trophique des cours d'eau dépend des détritiques organiques importés par le courant, en raison du manque de producteurs primaires qui caractérise ce type d'environnement (Bettinetti et al., 2007 ; Fenoglio & Bo, 2009). Pour ces raisons, (Minshall, 1984) définit le compartiment sédimentaire des milieux lotiques comme la scène sur laquelle se déroule la vie des fleuves et des rivières.

1.2.1 Les différents types de charge sédimentaire des cours d'eau et leurs caractéristiques

La nature des matériaux qui composent la charge sédimentaire d'un cours d'eau est très diversifiée et elle peut être caractérisée par plusieurs types de paramètres, comme le poids spécifique, la forme, la taille, etc. (Lefort, 2018). Ce dernier est probablement celui le plus utilisé et il occupe beaucoup de place au sein de la littérature scientifique. Grâce à lui, il est possible de différencier les sédiments en plusieurs familles, au sein d'une échelle granulométrique. Au fil du temps, plusieurs types d'échelles granulométriques ont été établies, qui varient plus ou moins entre elles : on peut citer celle dite du « phi » (Krumbein, 1934), le Gradistat (Blott & Pye, 2001) ou le Système canadien de classification des sols (DGR, 2002). En France, on a longtemps utilisé l'échelle granulométrique dite de « Atterberg », dont l'une des particularités est de fixer la limite entre les argiles et les limons à 2 microns (Legros, 1996). L'échelle granulométrique la plus célèbre, celle qui trouve le plus d'espace dans la littérature, est probablement celle de Wentworth (1922), qui à partir du diamètre des sédiments crée six familles de particules (fig. 5) :

- Les blocs (boulders), c'est-à-dire toutes les particules dont la taille (d) est > 256 millimètres.

¹³ Les organismes benthiques sont toutes les espèces qui peuplent les fonds des milieux aquatiques (Capinera, 2006).

- Les cailloux (cobble), c'est-à-dire toutes les particules dont la taille est $256 < d < 64$ millimètres.
- Les graviers (gravel), c'est-à-dire toutes les particules dont la taille est $64 < d < 2$ millimètres.
- Les sables (sand), c'est-à-dire toutes les particules dont la taille est $2 < d < 0,0625$ millimètres.
- Les limons (silt), c'est-à-dire toutes les particules dont la taille $0,0625 < d < 0,0039$ millimètres.
- Les argiles (clay), c'est-à-dire toutes les particules dont la taille est $d < 0,0039$ millimètres.

TABLE I
THE GRADE TERMS

The Pieces	The Aggregate	The Indurated Rock
Boulder 256 mm. _____	Boulder gravel	Boulder conglomerate
Cobble 64 mm. _____	Cobble gravel	Cobble conglomerate
Pebble 4 mm. _____	Pebble gravel	Pebble conglomerate
Granule 2 mm. _____	Granule gravel	Granule conglomerate
Very coarse sand grain 1 mm. _____	Very coarse sand	Very coarse sandstone
Coarse sand grain 1/2 mm. _____	Coarse sand	Coarse sandstone
Medium sand grain 1/4 mm. _____	Medium sand	Medium sandstone
Fine sand grain 1/8 mm. _____	Fine sand	Fine sandstone
Very fine sand grain 1/16 mm. _____	Very fine sand	Very fine sandstone
Silt particle 1/256 mm. _____	Silt	Siltstone
Clay particle	Clay	Claystone

Figure 5 : L'échelle granulométrique de Wentworth (Source : Wentworth, 1922).

Comme Charlton (2008) et Fort et al. (2015) l'expliquent, les différents types de sédiments ne se meuvent pas de la même manière au sein du lit et pour cette raison il est possible de distinguer trois types de charge sédimentaire : la charge en solution, celle en suspension et celle de fond. La charge en solution se déplace dissoute dans l'eau et elle est composée par des éléments chimiques qui proviennent de la lithosphère, de l'atmosphère ou de substances d'origine anthropique : comme Hicks & Gomez (2016) l'affirment, elle est composée par des particules dont la taille est inférieure à 0,00045 millimètres. La charge en suspension se déplace au sein de l'eau et elle est composée par des particules très fines et légères (argiles et limons) qui proviennent du lessivage des versants environnants le lit ; la quantité de ce type de sédiments dans l'eau peut varier considérablement sous l'action de plusieurs facteurs, comme la lithologie, la morphométrie et la climatologie du bassin versant (Zaharia, 1998). La charge de fond se déplace sur la surface du lit et elle est composée par des particules grossières et lourdes (blocs, cailloux, graviers et sables) qui proviennent de la dégradation du chenal.

1.2.2 La mobilisation de la charge sédimentaire de la part de l'écoulement des cours d'eau

La mise en mouvement de ces différents types de charge est strictement liée aux forces qui règlent les processus hydrodynamiques, qui permettent de déplacer des matériaux, lesquels autrement seraient immobiles. La mobilisation des particules est directement proportionnelle à l'énergie de l'écoulement et si on reprend l'équation 1.3 on peut distinguer entre trois états de la dynamique sédimentaire des cours d'eau (Ciccacci, 2015 ; Panizza, 2014) :

- L'érosion, quand $E_n > 0$.
- Le transport, quand $E_n = 0$.
- La sédimentation, quand $E_n < 0$.

Toute particule située dans le lit d'un cours d'eau est soumise à l'action de son poids, qui « l'écrase » contre le fond et en empêche le mouvement, et à celles qui caractérisent l'écoulement dans lequel elles sont immergées. Comme on l'a vu dans le paragraphe précédent, l'une de celles-ci est la force de traînée, qui s'applique parallèlement au lit et provoque une diminution de la pression sous les sédiments qui y sont déposés, comme l'énonce le Principe de Bernoulli¹⁴. Ce phénomène engendre la formation de la force de portance qui, comme le

¹⁴ Le Principe de Bernoulli affirme que simultanément à l'augmentation de la vitesse d'un fluide a lieu une diminution de sa pression statique ou son énergie potentielle.

poids, agit perpendiculairement au lit du cours d'eau, mais dans la direction opposée, provoquant l'érosion (le surélévement) des particules. Au fur et à mesure qu'elles avancent dans la colonne d'eau, la magnitude de la force de portance diminue et celle du poids reprend le dessus. Si la turbulence de l'écoulement est assez forte pour s'opposer au poids des sédiments leur chute est arrêtée et elles sont transportées dans le liquide. Autrement, si elle n'est pas assez forte pour s'opposer au poids des particules, elles sédimentent sur le fond (Charlton, 2008).

Les sédiments ne sont pas mobilisés tous en même temps, mais l'écoulement met en place une sorte de tri granulométrique en fonction de son énergie. Cela détermine la capacité et la compétence d'un cours d'eau, c'est-à-dire le volume et la taille des particules qu'il peut entraîner (Amat et al., 2008 ; Musy et al., 2014). Les cours d'eau qui présentent des valeurs d' E_n positives sont ceux qui ont les capacités les plus importantes, car ils peuvent mobiliser et transporter des nouvelles particules. En dehors des torrents de montagne, qui présentent le plus souvent une énergie nette positive en raison de leur forte pente, une telle capacité est atteinte à l'occasion des débits les plus abondants et plus précisément à l'occasion du débit dit de « pleins bords », qui a lieu juste avant que le cours d'eau déborde dans son lit majeur (Albert, 1992 ; Bravard & Petit, 2000). La compétence de l'écoulement dépend aussi de son énergie et pour chaque type de sédiment il existe un seuil énergétique à partir duquel il est érodé, transporté ou sédimenté. À travers des expériences de laboratoire, Hjulström (1935) réussit à identifier ce seuil pour chaque type de particule, créant le célèbre diagramme qui porte son nom (fig. 6). Entre l'axe des abscisses, où est notée la taille des sédiments, et celui des ordonnées, où est notée la vitesse de l'écoulement, sont représentées deux courbes : la plus haute matérialise la vitesse à partir de laquelle les particules sont érodées et la plus basse la vitesse à partir de laquelle elles sédimentent. L'espace entre ces deux courbes représente la vitesse à laquelle les particules sont transportées. À partir de cette figure plusieurs considérations à propos de la dynamique sédimentaire des cours d'eau peuvent être émises. L'érosion a lieu essentiellement quand l'écoulement présente des fortes vitesses, c'est-à-dire quand son énergie est grande. Au contraire, le transport ne demande pas de grandes quantités d'énergie, car les forces de frottement statiques sont plus fortes que les forces dynamiques. Les sédiments que l'écoulement mobilise le plus facilement sont ceux de taille moyenne, alors que les particules plus grosses et les plus petites le sont beaucoup moins. Dans le premier cas, cela est dû aux poids des sédiments grossiers et, dans le deuxième, à certains types de forces, par exemple les forces électrostatiques, qui augmentent la cohésion entre les matériaux fins. Une fois que ces matériaux de petite taille sont mobilisés, leur sédimentation demande des vitesses proches de

zéro et pour cette raison l'évacuation de la charge en suspension reste pratiquement constante (Marchetti, 2000)

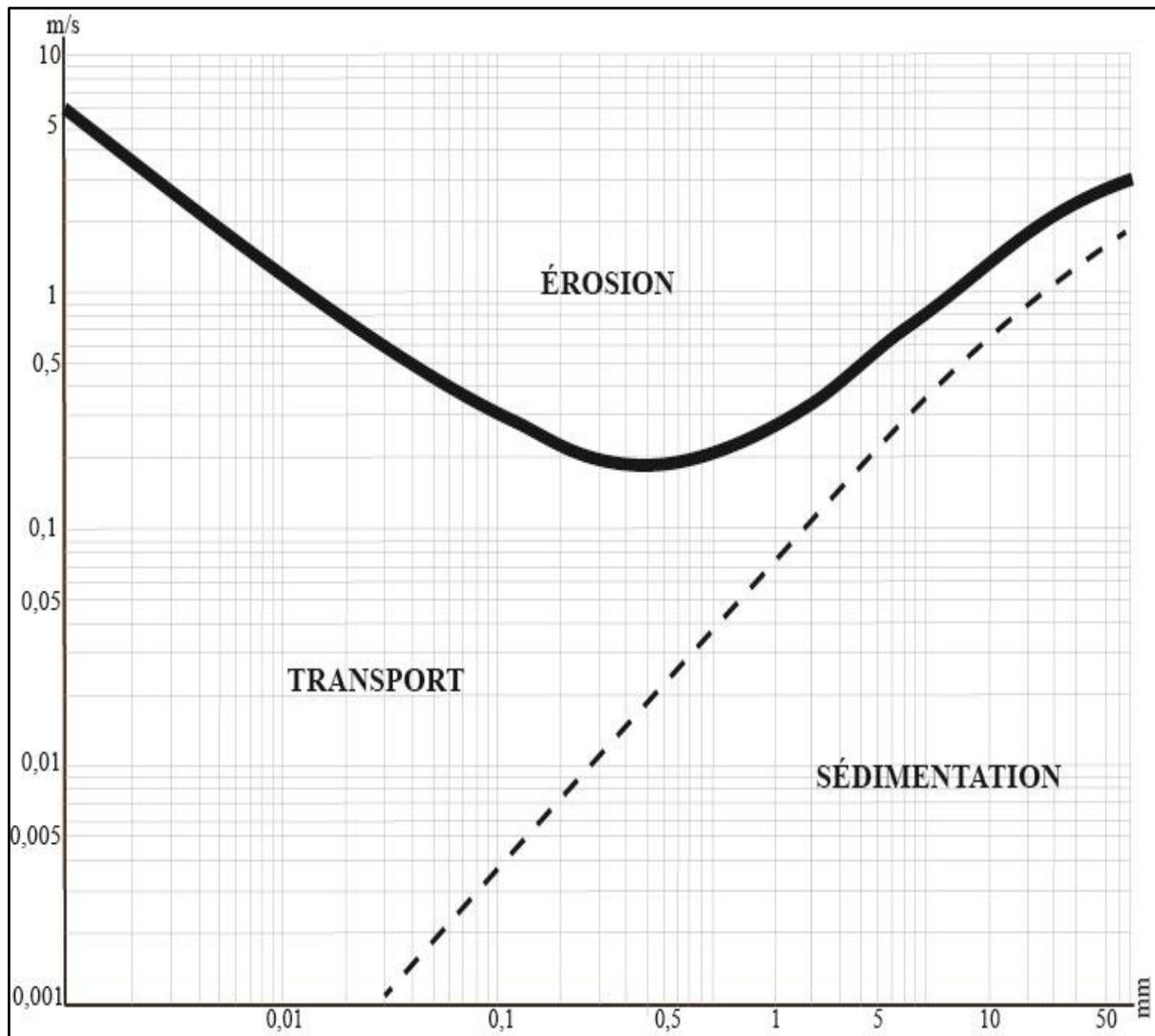


Figure 6 : Le diagramme de Hjulström (Modifiée par Francesco Donati, à partir de Hjulström (1935).

1.2.3 Les modalités de déplacement de la charge sédimentaire des cours d'eau

Les phénomènes d'érosion, transport et sédimentation qui se produisent dans les cours d'eau peuvent se présenter sous plusieurs facettes. Concernant l'érosion, Panizza (2014) en décrit quatre types : l'érosion stricto sensu, l'abrasion, la cavitation et la dégradation. L'érosion stricto sensu est probablement la plus classique et elle consiste dans le prélèvement des sédiments du fond et des berges du lit selon les modalités que nous avons décrites plus haut. L'érosion par abrasion est une conséquence directe de l'érosion stricto sensu. En effet, les particules transportées par le courant peuvent rentrer en collision avec les parois du chenal, en retirant des morceaux : plus la taille des particules qui heurtent le lit est grande, plus importante est l'efficacité de ce type d'érosion. L'érosion par cavitation est très similaire à

celle par abrasion, mais ses effets sont généralement moins importants. Elle a lieu grâce à l'action mécanique de l'eau sur les parois du chenal et notamment grâce aux augmentations de la vitesse ou du niveau de turbulence qui s'observent dans un cours d'eau et qui engendrent de soudaines variations de pression et la formation de boules de vapeurs. Comme les sédiments emportés par le courant, les boules agissent comme un abrasif sur les parois du chenal, en retirant de petits éclats. L'expression « érosion par dégradation » comprend plusieurs phénomènes morphogéniques qui peuvent intéresser les parois du lit. Ils peuvent être de type physique, comme la gélivation ou l'alternance d'immersion-émersion, ou de type chimique, comme l'hydrolyse. La mise en place de ces quatre types d'érosion dépend beaucoup du type du lit : le premier phénomène de mobilisation de sédiments se produit principalement dans les lits composés de matériaux alluviaux, alors que les trois derniers ont lieu principalement dans les cours d'eau qui coulent directement sur le bedrock (Hancock et al., 1998).

Si le transport de la charge en suspension est assez uniforme avec la simple flottaison des particules au sein de l'eau, celui de la charge de fond peut avoir lieu selon des modalités différentes. En effet, généralement on distingue trois types de transport de fond : le transport par saltation, celui par charriage et celui par glissement. Le transport par saltation est le plus important et il se manifeste par des bonds plus ou moins grands des particules. Au sein d'un cours d'eau, ce type de transport est confiné à un espace bien précis, appelé « couche de saltation », délimité par la hauteur maximale que les particules peuvent atteindre et le fond du lit (Danel et al., 1953). Le transport par charriage se manifeste par la rotation des sédiments et il peut être considéré comme une sorte de transition avec celui par saltation. En effet, si on pouvait observer de très près une particule qui se déplace de cette façon, on remarquerait qu'elle accomplit en réalité de très petits bonds qui lui permettent de rouler. Le transport par glissement se manifeste par la translation des particules sur le fond et dans ce cas aussi les sédiments accomplissent des sauts, encore plus petits que ceux des sédiments qui se déplacent par roulage. Toutefois, cette dernière modalité de transport de la charge de fond est négligeable par rapport aux autres, car la rugosité du lit peut la rendre très difficile (Gilbert, 1914).

1.3 Les caractéristiques thermiques des cours d'eau

Comme pour tous les milieux aquatiques, le fonctionnement thermique des fleuves et des rivières joue un rôle très important pour la caractérisation des habitats et surtout pour la survie des espèces qui les peuplent. En effet, la température de l'eau régit le développement, le métabolisme et la productivité des espèces aquatiques, qui à exclusion des mammifères

aquatiques sont poïkilothermes. En outre, elle influence un grand nombre de processus physico-chimiques de l'eau (Bettinetti et al., 2007 ; Fenoglio & Bo, 2009).

1.3.1 Les facteurs qui déterminent la température des cours d'eau

Dans les milieux aquatiques, la température de l'eau résulte de plusieurs facteurs qui lui apportent ou enlèvent des calories et que généralement dans la littérature scientifique on réunit dans une équation, laquelle permet de calculer ce qui est communément appelé le « bilan thermique ». Selon Caissie (2006) et Ward (1985), pour ce qui concerne les cours d'eau ces facteurs peuvent être subdivisés en quatre groups (fig. 7) :

- Le premier groupe est constitué des facteurs atmosphériques, qui parmi tous sont les plus efficaces sur la température des eaux. La radiation solaire est le plus influent, car il représente la principale source d'énergie thermique pour un cours d'eau et son effet varie en fonction de la zone géographique, des conditions météorologiques, etc. (Webb & Zhang, 2004). La température atmosphérique joue aussi un rôle important, à tel point qu'il a été démontré qu'entre la température de l'eau et celle de l'air existe une relation linéaire (Mohseni & Stefan, 1999). Les autres facteurs atmosphériques qui influencent la température d'un cours d'eau sont les phénomènes d'évaporation et de condensation (D. Caissie, 2006).
- Le deuxième groupe est constitué des facteurs topographiques qui dépendent des caractéristiques de l'espace environnant un cours d'eau, comme l'exposition de la vallée, son altitude, son substrat ou la densité de la ripisylve. Celle-ci est particulièrement influente sur la température, car elle bloque la radiation solaire et ombrage les eaux (Moore et al., 2005). Si la végétation est très épaisse et si le cours d'eau n'est pas très large, la ripisylve représente une barrière également pour le vent, limitant ainsi certains phénomènes de refroidissement (Story et al., 2003).
- Le troisième groupe est constitué de facteurs hydrologiques comme le débit du cours d'eau et des caractéristiques de celui-ci. Généralement, plus la colonne d'eau est faible, plus grande est la sensibilité des eaux aux facteurs qui en contrôlent la température : à titre d'exemple, au cours des débits les plus importants, les eaux accumulent une faible quantité de chaleur, alors qu'en période d'étiage elles en accumulent beaucoup par unité de volume. Le régime du cours d'eau aussi joue un rôle très important d'un point de vue thermique, par exemple les cours d'eau dont le

régime est pluvial sont généralement plus chauds que ceux dont le régime est nival (Beaufort, 2015).

- Le quatrième groupe est constitué des échanges avec les eaux souterraines. Ils sont d'autant plus importants au fur et à mesure qu'on remonte vers l'amont des cours d'eau et ils deviennent prédominants à l'approche de leurs sources. Quand les eaux de la nappe remontent en surface elles peuvent fortement influencer la température d'un cours d'eau, leur température étant quasi constante. Pour cette raison, plusieurs études ont démontré que les cours d'eau soumis à ces processus sont plus frais en été et plus chauds en hiver par rapport à ceux qui ne le sont pas, créant des zones refuge pour les espèces (Ebersole et al., 2003 ; Hayashi & Rosenberry, 2002 ; Kaandorp et al., 2018 ; Power et al., 1999). Cette capacité des sources à influencer la température des eaux est soumise aux fluctuations saisonnières de leur débit, mais aussi du type de substrat et du type de source.

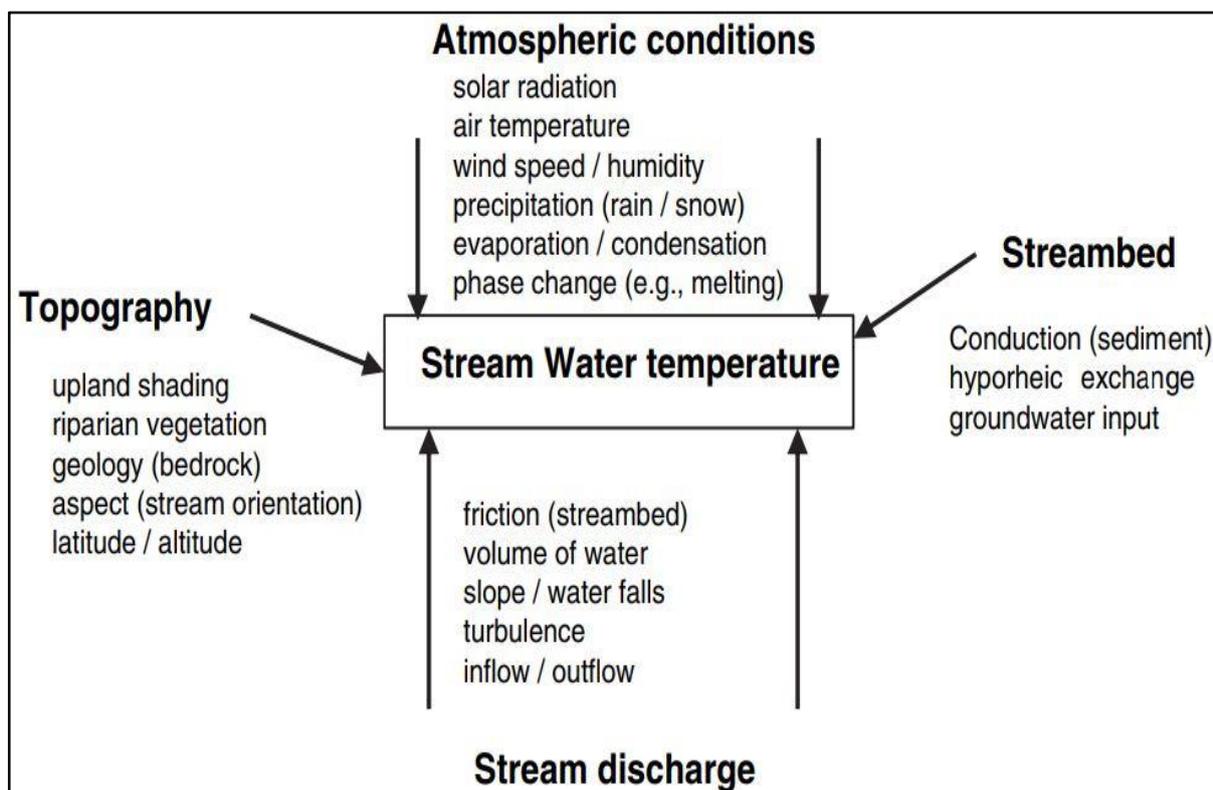


Figure 7 : Les facteurs qui influent sur la température des cours d'eau (Source : Caissie, 2006).

1.3.2 Les variations temporelles de la température des cours d'eau

L'action de cet ensemble de facteurs n'est pas constante dans le temps, mais elle varie en fonction des saisons et des heures de la journée. Ainsi, le fonctionnement thermique des cours d'eau peut être apprécié à travers deux échelles temporelles : celle annuelle et celle diurne. Du

point de vue annuel, le régime thermique des cours d'eau évolue en fonction des saisons, assumant un aspect sinusoïdal (Webb & Walling, 1993). Bien qu'il existe des différences en fonction du contexte géographique/climatique, à l'intérieur de la zone tempérée on observe généralement les températures les plus faibles pendant l'hiver et les plus élevées pendant l'été. Si ce cycle thermique est commun à tous les cours d'eau, ses amplitudes peuvent évoluer différemment sous l'action de plusieurs facteurs. Caissie et al., (2005), à travers l'étude des températures collectées dans plusieurs cours d'eau, ont démontré que la taille du lit semble être particulièrement influente à ce sujet, comme on peut le voir dans la figure 8. Les températures dans le large Little Southwest Miramichi River et dans le petit Catamaran Brook sont pratiquement identiques au cours de l'hiver et de l'automne, alors que pendant la période estivale elles sont nettement plus chaudes dans le cours d'eau le plus grand. Cela est dû au fait que les grands cours d'eau exposent une plus grande surface à l'action des agents atmosphériques que les plus petits, qui par exemple peuvent être mieux ombragés par la ripisylve.

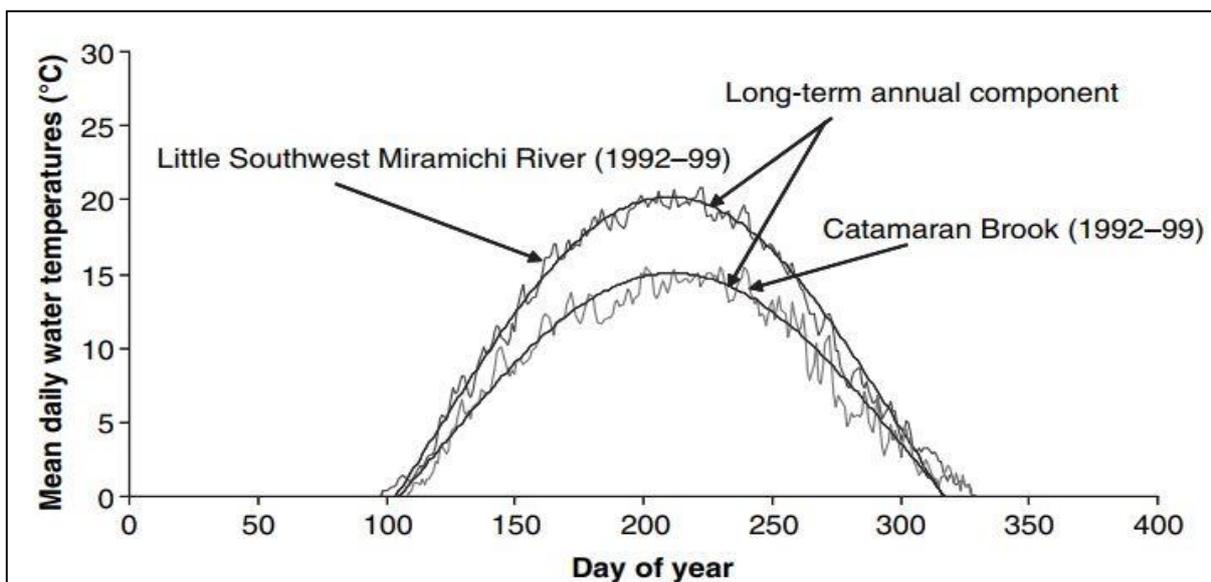


Figure 8 : La variation de la température de l'eau au cours d'une année dans le Little Southwest Miramichi River et dans le Catamaran Brook (Source : Caissie et al. 2005)

Du point de vue journalier la température d'un cours d'eau évolue entre le jour et la nuit, en fonction de la radiation solaire (Johnson, 2003), mais aussi des échanges eau-air (Smith et al., 1975 ; Sullivan & Adams, 1991) et de l'évaporation (Evans et al., 1998). Les températures les plus hautes sont généralement observées pendant les heures diurnes et les plus faibles pendant celles nocturnes (Łaszewski, 2013). La différence entre la température maximale et la minimale donne « l'amplitude thermique journalière », laquelle montre l'ampleur du cycle thermique diurne et contrôle d'importantes fonctions biologiques pour les organismes

aquatiques (Tissot & Souchon, 2010). Normalement, le cycle thermique journalier des cours d'eau atteint les températures maximales pendant la fin de l'après-midi et les minimales très tôt le matin (D. Caissie, 2006).

1.3.3 Les variations spatiales de la température des cours d'eau

La température d'un cours d'eau varie également spatialement, le long des axes longitudinaux, transversaux et verticaux. Les fluctuations les plus remarquables ont lieu le long de l'axe longitudinal du lit : les parties des cours d'eau situées en proximité des sources présentent une température similaire à celle des eaux souterraines et au fur et à mesure qu'on procède vers l'aval la température s'adapte aux conditions climatiques et environnementales qu'elle rencontre le long de son trajet. Au fil du temps, de nombreux scientifiques ont essayé de quantifier le gradient thermique longitudinal des cours d'eau et dans la bibliographie scientifique il est possible de trouver plusieurs valeurs. À titre d'exemple, Torgersen et al. (2001) affirment que la température des larges cours d'eau varie de 0,09 °C par kilomètre, alors que Zwieniecki & Newton (1999) déclarent que, dans les cours d'eau étroits, cette valeur peut atteindre 0,6 °C par kilomètre. D'autres scientifiques, sur la base de ce gradient, ont essayé de créer des zonations des cours d'eau, afin de prédire le peuplement des tronçons fluviaux en fonction de leur situation géographique. À ce propos, célèbres sont les recherches de Verneaux (1973, 1976a, 1976b, 1977a, 1977b) qui prenant en compte l'évolution longitudinale de plusieurs facteurs abiotiques, dont la température, créa dix « biotypes », chacun correspondant à un peuplement piscicole différent.

Le long de l'axe transversal aussi il est possible d'observer des variations thermiques, mais elles sont généralement très localisées et attribuées à certains facteurs de contrôle, comme la morphologie du chenal ou la densité de la ripisylve. En effet, en correspondance de soudaines variations dans la largeur du lit, on observe une augmentation de la température à cause de la plus grande surface d'eau exposée aux éléments atmosphériques (Poole et al., 2001). De même, certaines formes fluviales sont associées à des soudains réchauffements des eaux, comme les rivières en tresses qui, à cause de la très grande largeur de leur lit et des nombreux petits chenaux qui les caractérisent, sont particulièrement sensibles à ce phénomène (Wawrzyniak et al., 2013). Comme on l'a déjà dit plus haut, la végétation riparienne est l'un des principaux facteurs de contrôle de la température des cours d'eau et elle peut être responsable d'importants gradients thermiques transversaux au sein des sections des cours d'eau. Ils se manifestent par une

diminution de la température de l'eau qui va du centre du chenal vers les berges, où la couverture de la végétation est plus efficace (Webb & Walling, 1996).

Normalement, le long de l'axe vertical, la température de l'eau des cours d'eau est uniforme, à cause du mouvement unidirectionnel de l'écoulement et de la turbulence qui diffusent la chaleur uniformément au sein de la colonne d'eau (Bettinetti et al., 2007). Toutefois, au cours des périodes les plus chaudes de l'année, quand l'écoulement est faible et la radiation solaire est forte, peuvent se former des gradients verticaux de température, laquelle diminue de la surface vers le fond du cours d'eau (Handcock et al., 2012 ; Wawrzyniak, 2012). Généralement, ce phénomène est circonscrit aux heures centrales de la journée (Webb et al., 2008) et il intéresse principalement certaines zones, comme les tronçons des cours d'eau des plaines alluviales (Angelier, 2000), mais aussi certaines formations hydromorphologiques, où les profondeurs deviennent importantes et les vitesses faibles.

Donc, les milieux lotiques sont ces environnements aquatiques caractérisés par un mouvement constant et longitudinal des eaux, qui leur donne une énergie suffisante pour mobiliser une charge sédimentaire et homogénéiser la température de l'eau. Ce type de fonctionnement contraste de manière remarquable avec celui des milieux lenticques.

2. LES MILIEUX LENTIQUES

En observant les lignes d'eau qui confèrent aux réseaux hydrographiques leur configuration typique ramifiée, on remarque qu'à certains endroits elles changent d'aspect, devenant soudainement des étendues d'eau plus ou moins vastes. En effet, il se peut que les fleuves et les rivières voient leur trajet entravé par un obstacle ou qu'ils terminent dans un affaissement qu'ils remplissent avec leurs eaux : se forment ainsi les plans d'eau¹⁵.

Ils occupent un espace fermé communément appelé « cuvette » (Meybeck, 1995), dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. Dans le premier cas, elle est générée par des phénomènes comme les mouvements tectoniques, les éboulements de terrain, l'érosion des glaciers, etc. Dans le deuxième cas, elle se forme en bouchant la vallée d'un cours d'eau par un ouvrage et en imitant en quelque sorte les phénomènes naturels cités supra. Dans la littérature, le premier type de plan d'eau est habituellement appelé « lac », alors que le deuxième est appelé « retenue ». Quoi qu'il en soit de leur origine, tout type de plan d'eau peut être décrit selon plusieurs indices morphologiques (Hakanson, 1981 ; Wetzel, 1983) :

- La longueur maximale, c'est-à-dire la ligne imaginaire qui relie les deux points les plus éloignés du plan d'eau.
- La largeur maximale, c'est-à-dire la ligne imaginaire qui relie les deux points les plus éloignés du plan d'eau, perpendiculairement à la longueur maximale.
- La superficie, c'est-à-dire la planimétrie du plan d'eau.
- Le volume, c'est-à-dire l'espace occupé par l'eau contenue dans le plan d'eau.
- La profondeur moyenne et maximale de la cuvette.
- Le périmètre, c'est-à-dire la longueur totale de la ligne de côte du plan d'eau.
- Le développement du périmètre, c'est-à-dire le rapport entre le périmètre du plan d'eau et celui d'un cercle dont la surface est égale à celle du plan d'eau.

¹⁵ Les plans d'eau ne sont pas systématiquement alimentés par des cours d'eau. En effet, il en existe plusieurs qui sont totalement détachés du réseau hydrographique et qui sont remplis par les eaux de ruissellement ou par les eaux souterraines. Dans cette petite introduction nous avons mis en avant les plans d'eau formés par les fleuves et les rivières, car cette recherche est centrée principalement sur des milieux lentiques situés au fil des cours d'eau.

Ces paramètres morphométriques nous suggèrent que le concept de volume prend une grande importance dans les plans d'eau. Au volume est strictement liée la notion de temps de séjour des eaux à l'intérieur de la cuvette, qu'on définit justement comme le rapport entre la quantité d'eau contenue dans le plan d'eau et le débit du cours d'eau qui l'alimente ou qui le draine (Musy et al., 2014 ; Pilotti et al., 2014). Comme Poirel et al. (2001) l'expliquent, ce paramètre est très important en Limnologie, car il détermine en quelque sorte le degré de « lenticité » d'un plan d'eau : plus il est long, plus forte est la magnitude des processus limnologiques qui le caractérisent. Dans les lacs il apparaît généralement plus long que dans les retenues, qui normalement présentent un volume moins important et sont alimentées par des cours d'eau dont le débit est plus grand. La verticalité en revanche domine pratiquement tous les processus abiotiques et biotiques qui se produisent dans les plans d'eau et qui adviennent principalement dans la direction surface-fond, fait qui devient particulièrement évident quand on considère les phénomènes thermiques qui se produisent au sein de la cuvette. Pour cette raison, si pour suivre une logique cause-effet dans le chapitre précédant nous avons traité initialement le compartiment hydrodynamique et ensuite ceux sédimentaire et thermique, dans celui-ci il convient d'invertir le premier et le deuxième point

2.1 Le fonctionnement thermique des milieux lenticques

Dans les pages *supra*, nous avons vu comment, dans certaines zones des cours d'eau caractérisées par un écoulement calme et des profondeurs importantes, pouvait se former un gradient vertical de température-densité, quand certaines conditions climatiques et hydrologiques étaient réunies. Dans les plans d'eau, l'important volume d'eau et la faible intensité des processus hydrodynamiques font en sorte que ce phénomène soit la norme et qu'il soit beaucoup plus durable et intense. Dans la littérature, il prend le nom de « stratification thermique » de la colonne d'eau et il est considéré comme le centre de toute la Limnologie, car il conditionne tous les compartiments abiotiques et biotiques des plans d'eau (Touchart, 2002, 2007a).

2.1.1 Le rapport entre la température et la densité de l'eau

Pour comprendre le phénomène de stratification thermique, il est tout d'abord nécessaire d'expliquer brièvement certaines propriétés physicochimiques de l'eau. La densité de ce liquide

subit des variations en fonction de sa température¹⁶, augmentant au fur et à mesure que sa température diminue, jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur de densité maximale autour de 4 °C. En raison de ce qu'on appelle « Anomalie dilatométrique », contrairement à la plupart des substances présentes sur Terre dont la densité ne cesse pas d'augmenter avec la diminution de la température, quand l'eau dépasse ce seuil thermique sa densité commence à baisser. La transformation d'état que l'eau subit quand elle atteint le 0 °C (la transformation en glace), provoque une perte supplémentaire de densité : ce fait est facilement observable dans la vie quotidienne, quand on constate que l'eau gelée à 0 °C flotte au-dessus de l'eau (Dussart, 1992).

2.1.2 Les différents types de stratification thermique de la colonne d'eau d'un plan d'eau

Comme Touchart (2002) l'explique, en raison de ces caractéristiques physicochimiques le profil thermique de la colonne d'eau des plans d'eau peut assumer trois configurations différentes (fig. 9) :

- Il peut diminuer de la surface vers le fond (stratification thermique directe)
- Il peut augmenter de la surface vers le fond (stratification thermique inverse).
- Il peut être homogène de la surface vers le fond (homothermie).

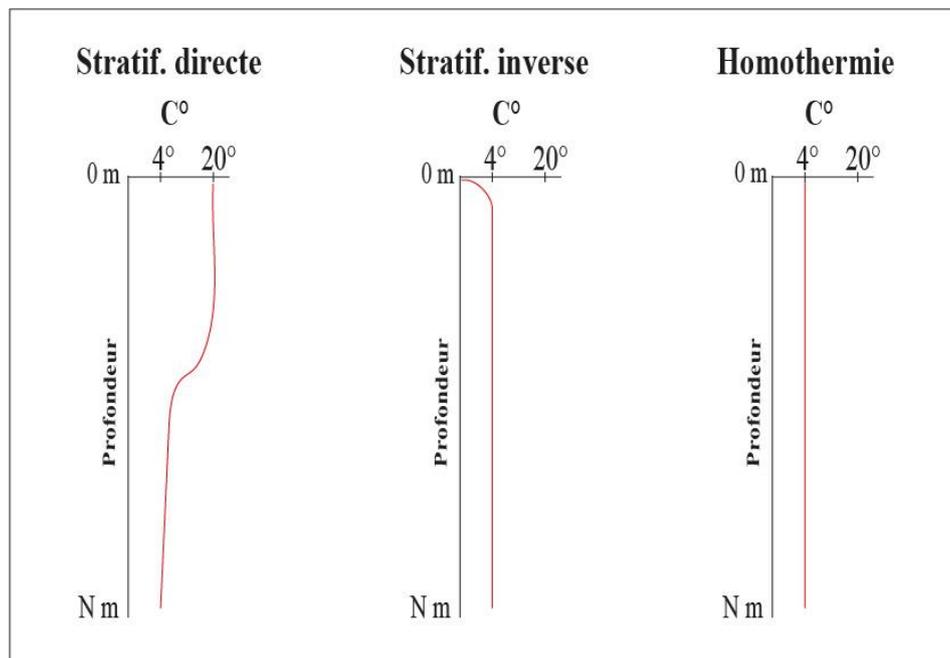


Figure 9 : Les différents types de stratification thermique. Les températures qui ont été insérées dans cette image ont été insérées à titre d'exemple (Réalisation : Francesco Donati).

¹⁶ Cette affirmation est vraie uniquement pour les milieux aquatiques d'eau douce, comme les cours d'eau ou les plans d'eau. Dans les milieux aquatiques d'eau salée, d'autres variables peuvent influencer ce phénomène, comme justement la salinité.

Entre les eaux qui présentent une température différente se forme une véritable barrière de densité, qui subdivise la colonne d'eau en couches d'eau distinctes et qui empêche tout échange entre celles-ci. Elle est communément appelée « thermocline » ou « couche de saut thermique » et elle est définie comme la strate de la colonne d'eau où le gradient de température est le plus élevé (Hutchinson, 1957). Ainsi, dans les lacs, la couche d'eau superficielle est appelée « Épilimnion », celle en profondeur « Hypolimnion » et celle qui les sépare « Métalimnion ». Bien que dans la littérature limnologique on estime que tout étang est compris à l'intérieur d'un étage supérieur d'un lac, dans ces petites retenues aussi le phénomène de stratification thermique existe, mais la nomenclature des différentes strates change (fig. 10). En effet, la couche d'eau superficielle est appelée « Épistagnion », celle en profondeur « Hypostagnion » et celle qui les sépare « Métastagnion », quand elle a l'épaisseur d'une strate (Touchart, 2007a).

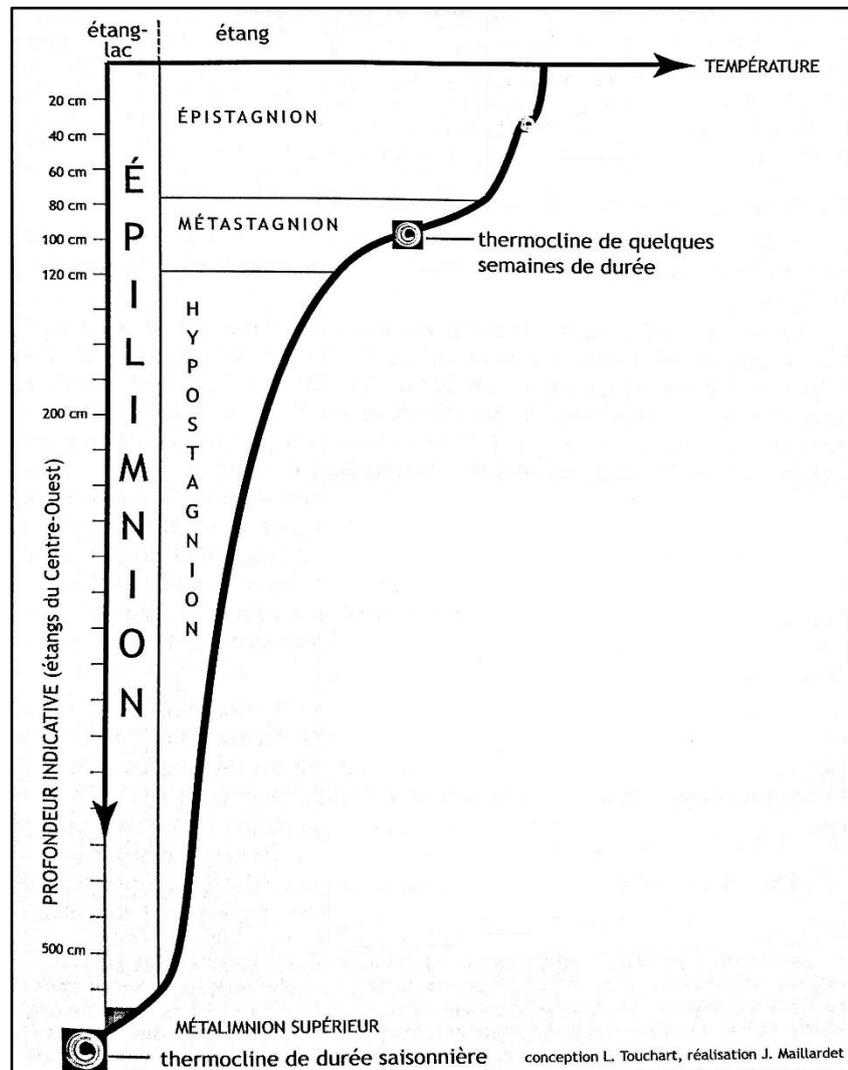


Figure 10 : Les différents profils thermiques que la colonne d'eau d'un plan d'eau peut présenter (Modifié à partir de Touchart, 2007b).

Dans un souci d'exhaustivité, nous devons également mentionner le gradient thermique horizontal qui se forme dans les plans d'eau et notamment dans ceux qui présentent une grande surface, comme plusieurs limnologues l'ont mis évidence dans leurs recherches (*e.g* Malm et al., 1993 ; Naumenko et al., 1996). En effet, la zone littorale et la zone pélagique (ou limnetique) ont tendance à présenter des températures différentes au fil des saisons : généralement, au cours de l'été le premier secteur est plus frais et le deuxième plus chaud, alors que pendant l'hiver cette situation s'inverse, avec les bords de la cuvette qui présentent les températures les moins élevées et le large qui présente les températures les plus élevées. Ce phénomène est régi par un grand nombre de facteurs, comme la morphologie du lac, son orientation, son contexte topographique, son fonctionnement hydrodynamique, etc. Il est développé surtout dans les grands lacs, mais des recherches récentes ont montré que, même dans les étangs, une zonation pouvait se développer, surtout quand les rives sont boisées et le large ensoleillé (Choffel, 2019).

2.1.3 Les facteurs qui régissent la stratification thermique dans les plans d'eau

Dans ce cas aussi, le forçage externe peut être considéré comme le moteur des différents états thermiques de la colonne d'eau d'un plan d'eau (Touchart, 2002). En effet, il détermine la quantité de chaleur que l'eau emmagasine et sa distribution au sein de la cuvette. Comme pour les cours d'eau, la chaleur présente dans un plan d'eau est déterminée par son bilan thermique, qui dépend de plusieurs facteurs :

- Les facteurs atmosphériques, qui relèvent principalement du rayonnement solaire, des échanges eaux-air et de certains phénomènes comme l'évaporation et la condensation ; comme pour les cours d'eau, ils sont considérés comme les plus influents dans le bilan thermique d'un plan d'eau.
- Les facteurs hydrologiques, qui relèvent principalement de l'action du tributaire et de l'émissaire. En effet, en plus de l'eau, l'affluent et l'effluent convoient et retirent une quantité plus ou moins importante de calories, en fonction de leur régime ou conformation.
- Les facteurs dit « secondaires », qui relèvent de plusieurs types de phénomènes et qui, sauf exception, sont généralement peu influents dans le bilan thermique d'un plan d'eau. À titre d'exemple, dans les plans d'eau peu profonds la radiation solaire peut atteindre le fond, qui commence à se réchauffer et à transférer sa chaleur aux eaux.

La conductivité de l'eau étant très faible, la chaleur se propage dans un plan d'eau principalement à travers deux phénomènes : la convection libre et la convection mécanique.

Dans le premier cas, elle se diffuse grâce aux mouvements verticaux des différentes masses d'eau qui découlent des changements de densité. Pendant une stratification directe, un refroidissement soudain des eaux à la surface fait plonger celles-ci vers le fond et, grâce à ce mécanisme, l'homothermie de la colonne d'eau peut se mettre en place si le refroidissement perdure dans le temps. Cela se produit également pendant une stratification inverse, mais dans ce cas le fait qui déclenche ce type de propagation est un soudain réchauffement des eaux à la surface. Dans le deuxième cas, c'est une force externe, généralement le vent, qui répand la chaleur à travers la turbulence qu'il génère dans les eaux. Si le plan d'eau est en état d'homothermie, la turbulence est libre d'agir dans toute la colonne d'eau, en fonction de la magnitude de la force qui la provoque. Au contraire, si le plan d'eau est stratifié, l'action de la turbulence est entravée par les barrières de densité, qui peuvent être dépassées uniquement si le vent est assez fort pour les briser.

2.1.4 Le fonctionnement thermique des étangs en contexte tempéré

Selon Touchart (2007b), les étangs présentent un fonctionnement thermique spécifique, qui diffère de celui des lacs notamment en ce que concerne la durée des cycles de stratification thermique. Selon cet auteur, dans le contexte climatique tempéré on peut distinguer trois situations différentes : celle des étangs profonds (entre 5 et 8 mètres de profondeur), celle des étangs de profondeur moyenne (plus d'un mètre de profondeur) et celle des étangs peu profonds (quelques décimètres de profondeur). Dans le premier cas, les stratifications thermiques ont une durée presque saisonnière, comme celles qu'on pourrait observer dans les lacs. Dans le deuxième cas, les stratifications thermiques peuvent durer pendant plusieurs semaines et elles alternent avec des périodes d'homothermie plus ou moins longues. Dans le troisième cas, les stratifications thermiques ne dépassent pas la journée, comme celles observables dans les mares. Dans la bibliographie limnologique, il est possible de trouver plusieurs classifications des plans d'eau établies en fonction du cycle de stratifications thermique qu'ils présentent. Selon celles établies par Hutchinson (1957) et Hutchinson & Löffler (1956), qui sont probablement les plus célèbres, en raison de ce fonctionnement thermique, les étangs rentrent dans la catégorie des plans d'eau « polymictiques », qui alternent fréquemment des phases de stratification et des phases d'homothermie. Plus précisément, selon la classification de Lewis (1983), ils peuvent être insérés dans la catégorie des plans d'eau « polymictiques discontinus », dont la stratification perdure pour quelques jours ou semaines.

L'instabilité des stratifications thermiques qui caractérise les étangs est mesurable à travers l'exemple de l'étang des Oussines présenté par Touchart (2007b), un étang situé dans le Centre-Ouest de la France, dont la surface est de 14,78 hectares et la profondeur maximale de 2,4 mètres. Pendant les mois hivernaux, la colonne d'eau de ce plan d'eau est principalement homotherme et des stratifications thermiques inverses se mettent en place uniquement pendant des périodes particulièrement froides. Pendant les mois printaniers, les températures de plus en plus chaudes font que la colonne d'eau est de moins en moins homotherme, avec de fréquentes formations de stratifications thermiques. Cette situation s'exacerbe pendant les mois estivaux et elle atteint son sommet pendant le mois d'août, où la colonne d'eau reste stratifiée pour la totalité du temps. Pendant l'automne, les stratifications thermiques laissent la place à des homothermies qui deviennent de plus en plus fréquentes au fur et à mesure qu'on se rapproche de la saison la plus froide de l'année. Aux Oussines, les stratifications thermiques se mettent en place au début de la matinée et elles durent jusqu'à la fin de l'après-midi, généralement entre 7:00 et 17:00. À contrario, elles disparaissent au cours du soir et de la nuit, mais en deux temps : entre 17:00 et 23:00 on assiste à un refroidissement de la surface et à un réchauffement du fond, alors qu'entre 23:00 et 7:00 c'est toute la colonne d'eau qui se refroidit. En été, la désertification complète n'est jamais due au refroidissement nocturne, mais aux perturbations atmosphériques, le seul facteur capable d'homogénéiser la colonne d'eau, quand il dure plusieurs jours.

2.2 Le fonctionnement hydrodynamique des milieux lenticques

Bien que dans l'imaginaire commun les eaux des plans d'eau soient stagnantes et immobiles, le compartiment hydrodynamique de ce type d'environnement est très riche et caractérisé par plusieurs types de flux d'eau, qui sont à la fois horizontaux et verticaux. Cela est possible grâce à la variété des forces qui rentrent en jeu pour les déterminer, qui sont très différentes de celles qui interviennent dans les milieux lotiques.

2.2.1 L'annulation de l'écoulement du tributaire

Le fait hydrodynamique le plus remarquable qu'il est possible d'observer dans un plan d'eau est justement le calme apparent du volume d'eau qu'il contient. Cela est dû à la conformation de la cuvette lacustre, qui étant un espace fermé, arrive à équilibrer l'action de la force de gravité responsable de l'écoulement des eaux dans la nature, comme on l'a vu dans les pages précédentes. Pour comprendre dans le détail les mécanismes qui sont à la base de ce phénomène, il est nécessaire de reprendre les lois de la mécanique des fluides que nous avons abordées dans le premier chapitre. Dans la partie 1.1 nous avons vu que selon la « Loi

fondamentale de l'équilibre des fluides » un liquide conserve son état de repos tant que sur celui-ci agissent des pressions qui le compriment dans toutes les directions. Dans les plans d'eau cette situation se vérifie, comme nous pouvons le voir dans la figure 11 : les pressions exercées par les parois ($\vec{p}_1, \vec{p}_2, \vec{p}_4, \vec{p}_5$) et le fond de la cuvette lacustre (\vec{p}_3) compensent celles de la masse d'eau « e » qu'elle abrite.

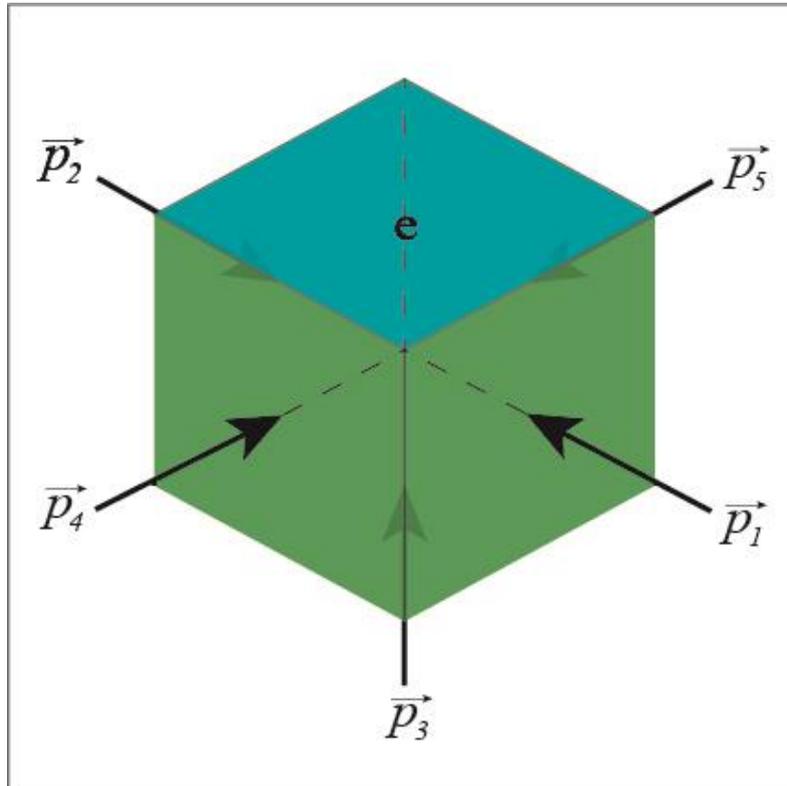


Figure 11 : Les pressions exercées par la cuvette sur la masse d'eau qu'elle contient (Réalisation : Francesco Donati).

Cet ensemble de pressions permet de compenser l'action de la composante parallèle au versant de la force de gravité, comme on peut le voir dans la figure 12. En effet, dans un plan d'eau l'action de cette force est équilibrée par la force normale à la cuvette lacustre (\vec{F}_{ncl}), qui l'empêche e de s'écouler.

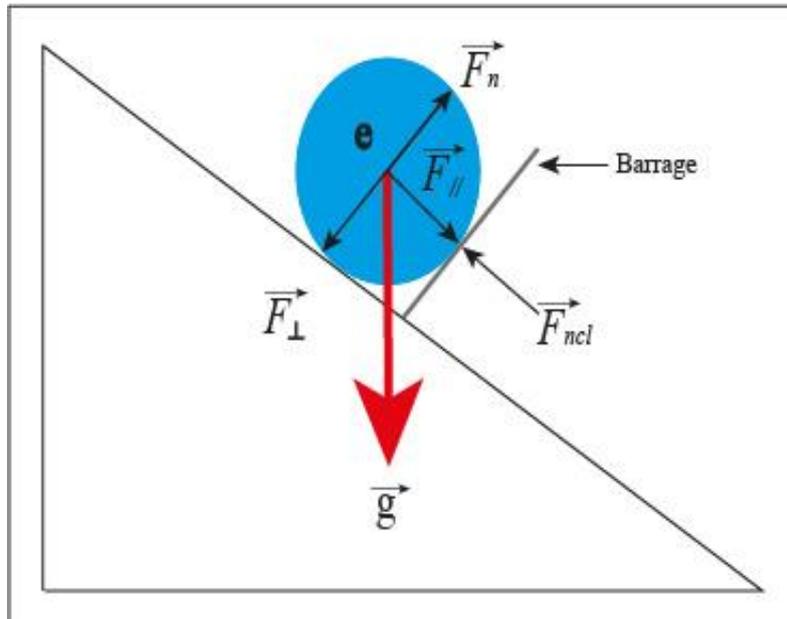


Figure 12 : Les forces qui arrêtent l'écoulement du tributaire dans un plan d'eau, dans ce cas dans une retenue (Réalisation : Francesco Donati).

2.2.2 Les forces à la base des processus limnologiques et la zonation spatiale des retenues

Avant de continuer la narration des vicissitudes hydrodynamiques des plans d'eau, il convient de dédier un court paragraphe à la clarification de certains concepts limnologiques fondamentaux. En Limnologie, avec la locution « forçage externe », on désigne l'ensemble des forces responsables de tous les processus qui ont lieu dans les plans d'eau, dont la principale caractéristique est d'avoir une origine externe à la cuvette. Leur action est tellement importante pour le fonctionnement des milieux lenticques que Dussart (1992) utilise le forçage externe pour définir l'essence même d'un lac. Dans son célèbre manuel de Limnologie intitulé « Limnologie : l'étude des eaux continentales », cet auteur le décompose en quatre familles de phénomènes, en fonction de leur origine :

- Ceux qui dérivent de l'action du soleil.
- Ceux qui dérivent des agents atmosphériques.
- Ceux qui dérivent des affluents ou des effluents.
- Ceux qui dérivent des précipitations.

Dépendant de phénomènes climatiques, l'action du forçage externe n'est pas constante dans le temps, mais elle fluctue au fil des saisons ou des journées, comme l'explique Lemmin (1995). À titre d'exemple, le débit de l'émissaire varie au cours de l'année selon les hautes et basses eaux, et la magnitude du rayonnement solaire change du jour à la nuit. Le même auteur

explique également que l'amplitude des réponses induites par le forçage externe change en fonction de la morphologie de la cuvette lacustre. À titre d'exemple, un plan d'eau qui présente un temps de séjour des eaux court est moins exposé à l'action du forçage externe et les processus limnologiques qui le caractérisent sont moins intenses que ceux d'un plan d'eau qui présente un temps de séjour des eaux long. En outre, dans ce petit plan d'eau artificiels, une force apparaît particulièrement influente sur leur fonctionnement interne : celle du tributaire. En effet, en raison de leur conformation, les retenues n'arrivent pas à se détacher complètement du cours d'eau qui les alimente, dont l'action s'affaiblit progressivement au fur et à mesure que l'écoulement progresse dans la cuvette et qu'il perd son inertie. Ainsi, dans la littérature scientifique, les retenues sont normalement divisées en trois secteurs distincts. De l'amont vers l'aval, on retrouve (Kennedy et al., 1982 ; Straškraba et al., 1993 ; Thornton, 1990) :

- La zone fluviale, où l'influence du tributaire est tellement forte que dans ce secteur on retrouve des conditions abiotiques typiquement lotiques.
- La zone de transition, où l'influence du tributaire commence à s'affaiblir et où on retrouve un mélange de conditions abiotiques lotiques et lentiques.
- La zone lentique, où l'influence du tributaire est pratiquement nulle et où on retrouve des conditions abiotiques typiquement lentiques.

Choffel (2019) donne deux exemples concrets de la progressive perte d'influence des tributaires des retenues et de la zonation de ces plans d'eau qui en résulte. Le premier exemple concerne le lac estonien de Nõmme, dont les caractéristiques morphologiques peuvent être comparées à celles d'un étang, sa superficie étant de 16 hectares et sa profondeur maximale de 5,5 mètres. Comme on peut le voir dans la figure 13, au sein de ce plan d'eau, l'auteur montre les valeurs de conductivité maximale, mettant en évidence l'effet du cours d'eau qui l'alimente. Au niveau de l'embouchure du tributaire, on observe que la conductivité maximale est particulièrement élevée et qu'elle s'affaiblit au fur et à mesure qu'on progresse dans le plan d'eau, jusqu'à atteindre de faibles valeurs à proximité de l'émissaire. Cela est dû à l'action du tributaire dont l'inertie s'affaiblit pendant qu'il progresse vers l'aval, où elle permet de ne transporter que peu de substances dissoutes. D'ailleurs, on remarque que le « nuage » de matières dissoutes dans l'eau ne s'étale pas dans la totalité de la cuvette lacustre, mais qu'il suit la direction du talweg du cours d'eau : ceci est un ultime exemple de comme les courants des tributaires influent sur la circulation interne des retenues.

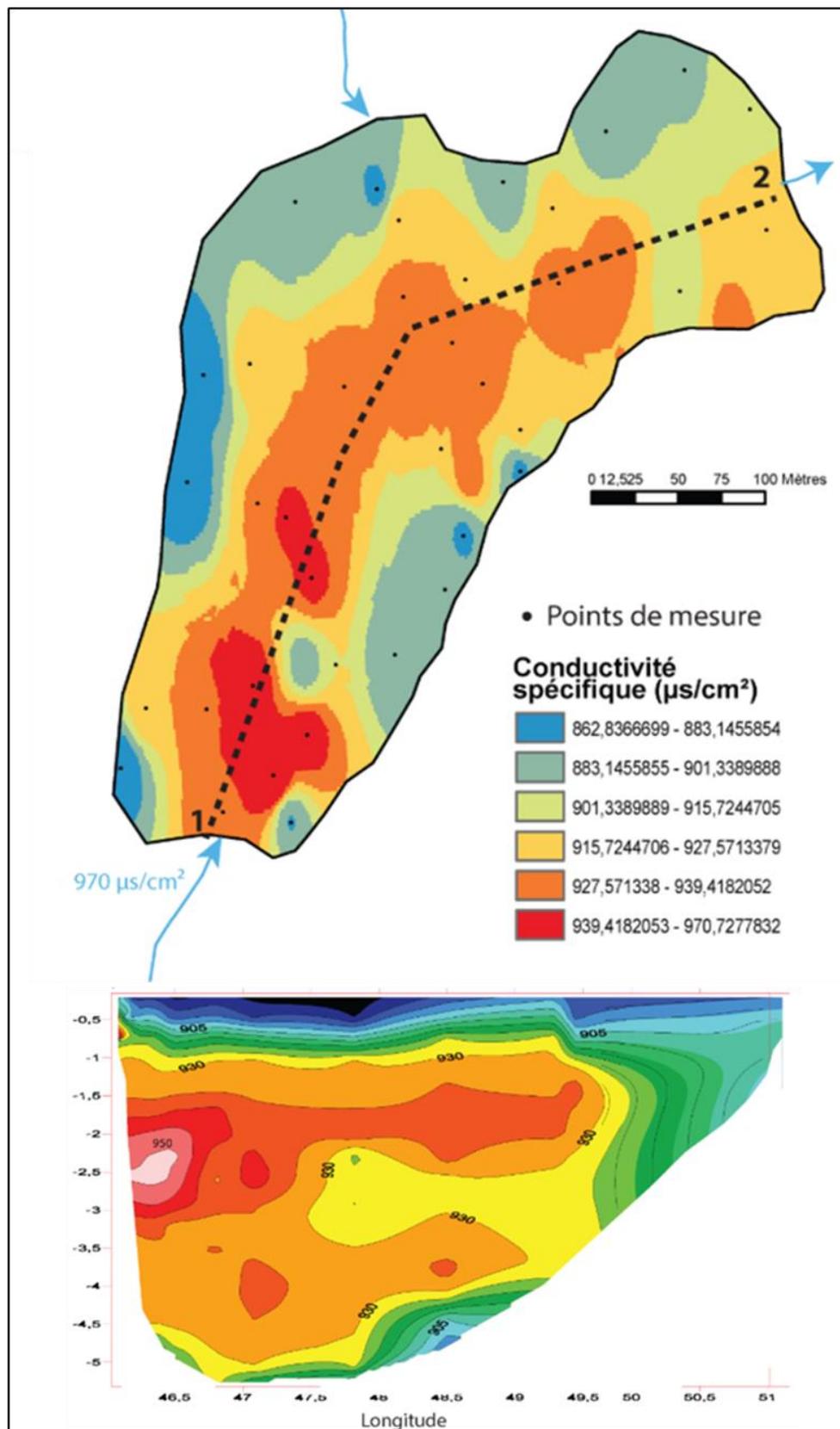


Figure 13 : La conductivité maximale au sein du lac estonien de Nõmme en surface et dans une coupe verticale (Source : Choffel, 2019).

Le deuxième exemple au contraire concerne l'étang Baerenthal, situé dans l'Est de la France et dans ce cas le paramètre que l'auteur étudie est la température du plan d'eau, comme on peut le voir dans la figure 14. Nous y distinguons très clairement la zone fluviatile, celle de transition et celle lenticque. La première se situe entre les distances 1 et 5 et elle est caractérisée par les eaux plus fraîches du tributaire, dont la progression à l'intérieur du plan d'eau est d'ailleurs clairement visible sur cette image. La deuxième se situe entre les distances 5 et 9 et elle est caractérisée par des eaux plutôt tièdes si comparées à celles que nous observons entre les distances 10 et 12, c'est-à-dire la zone typiquement lenticque du plan d'eau, où se situent les eaux les plus chaudes.

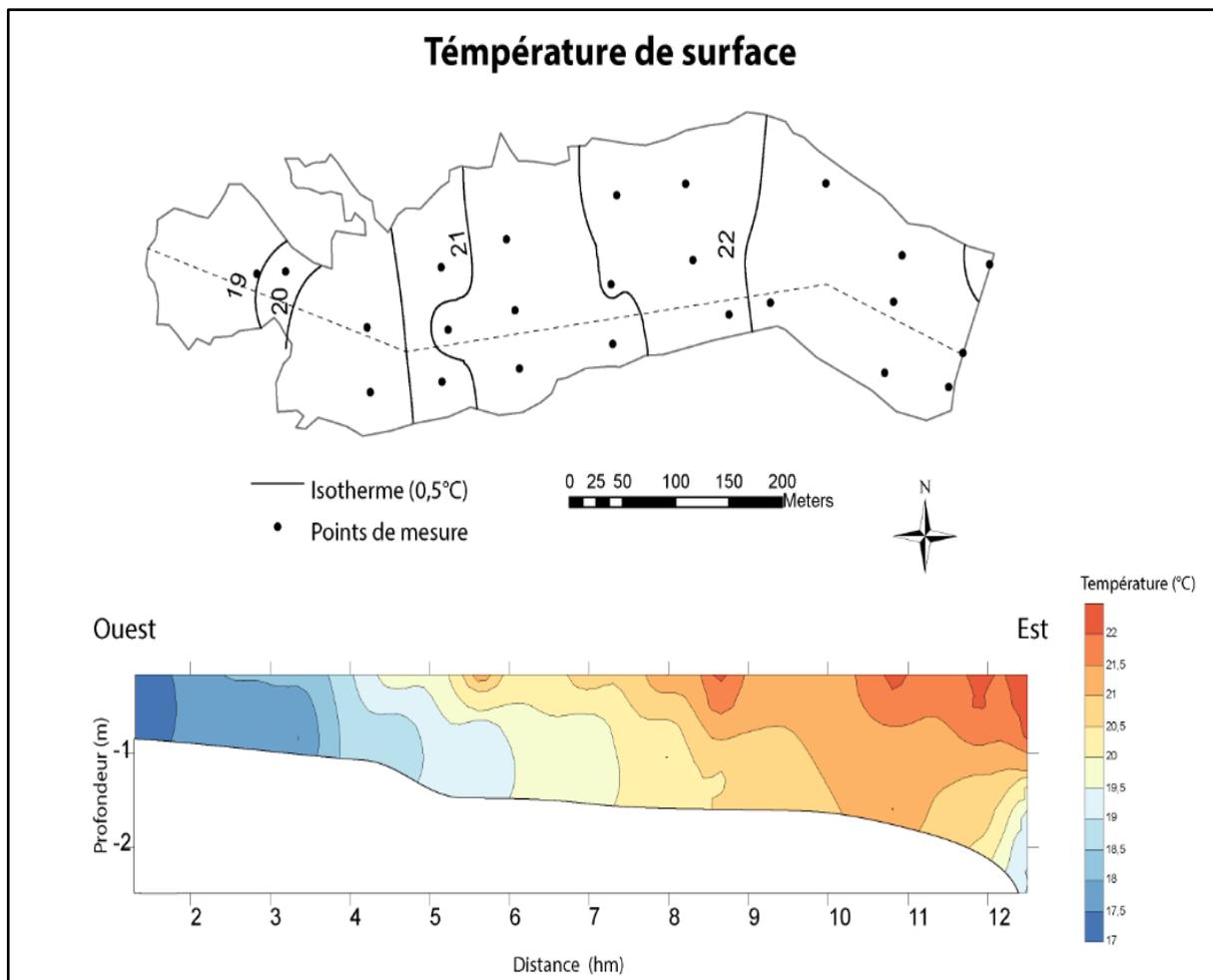


Figure 14 : La zonation thermique de l'étang de Baerenthal (Source : Choffel, 2019).

2.2.3 Les mécanismes de mobilisation des eaux au sein des plans d'eau

Grâce à l'action du forçage externe, au sein d'un plan d'eau, on observe plusieurs types de mouvements des eaux qui répondent à différents types de mécanismes de mobilisation. Ce sont (Ford, 1990) :

- L'advection, qui engendre des mouvements horizontaux par la friction du vent sur la surface de l'eau ou par l'action des cours d'eau qui se jettent ou qui se forment à partir du plan d'eau.
- La convection, qui engendre des mouvements des eaux verticaux à travers les changements de densité au sein de la colonne d'eau.
- La turbulence, qui engendre des mouvements des eaux chaotiques à cause de l'action du vent ou par le frottement des strates d'eau contre les parois de la cuvette.
- La diffusion, qui engendre des mouvements des eaux verticaux générés par le mouvement chaotique des molécules d'eau (donc sans aucune intervention de la part du forçage externe) ou par la turbulence du liquide.

Deux considérations majeures doivent être faites à propos de ces mécanismes de mobilisation des eaux. Premièrement, leur magnitude et leur durée ne sont jamais constantes dans le temps, car elles suivent la variabilité du forçage externe ; en outre, elles peuvent prendre toutes les directions, car le sens des forces qui les génèrent n'est pas figé comme celui de la force de gravité qui génère l'écoulement des cours d'eau. Selon Touchart (2002), ces deux aspects constituent la principale caractéristique du compartiment hydrodynamique des milieux lentiques, lequel est rarement défini par des mouvements d'ensemble, mais par des transferts inconstants et pluridirectionnels, engendrés par une multitude de causes.

2.2.4 Les flux d'eau des plans d'eau : les courants

Dans un plan d'eau, il existe plusieurs types de mouvements des eaux qui répondent à ces mécanismes de transport. On peut citer les oscillations du niveau des eaux, les vagues et les flux qui traversent horizontalement et verticalement la cuvette. Considérant les objectifs de cette recherche et le type de plans d'eau à laquelle elle se réfère, nous aborderons uniquement ce dernier type de mouvement, car les autres concernent surtout les grands lacs. Ce type de mouvement des eaux est communément appelé « courant » ou « ladière » et il représente la principale forme de déplacement des eaux au sein des plans d'eau. Selon Sverdrup (1942), ils peuvent être classifiés en fonction de leur origine et pour cette raison il est possible d'en distinguer deux types : ceux dûs au vent et ceux dûs à la densité des eaux.

Leurs caractéristiques ont été décrites dans le détail par Dussart (1992). Le premier type de courant est habituellement appelé « courant de dérive », il est induit par l'énergie mécanique des vents qui soufflent sur la surface de l'eau et son fonctionnement change en fonction de la

présence ou pas d'une stratification thermique au sein de la colonne d'eau. Ce phénomène que nous traiterons dans le détail par la suite influe sur la densité de l'eau, engendrant la formation de barrières physiques au sein de la colonne d'eau. Quand celles-ci ne sont pas présentes, les courants sont libres d'agir sur tout le volume d'eau et ils mobilisent une tranche d'eau qui dépend de l'énergie de la force qui les engendre. Au contraire, si les barrières sont présentes, elles entravent l'action des courants, qui dans ce cas ne mobilisent que les eaux les plus superficielles, à moins que la force qui les génère ne soit assez forte pour détruire les barrières de densité. Le deuxième type de courant est habituellement appelé « de densité », car il est provoqué par les ajustement verticaux de ce paramètre qui sont engendrés par le phénomène de stratification thermique de la colonne d'eau. Dans les retenues, un type de courant de densité particulièrement influent est celui provoqué par le tributaire du plan d'eau. Comme Ford & Johnson (1983) l'expliquent, l'eau du cours d'eau qui se jette dans le plan d'eau présente généralement une température différente de celle contenue dans la cuvette lacustre. Ainsi, quand l'écoulement fluvial arrive dans le plan d'eau et qu'il continue à avancer grâce à son inertie, il le fait à une profondeur qui dépend de sa température et densité. Cela génère trois types de courants de densité, appelés respectivement « overflow », « interflow » et « underflow ». Le premier intéresse la partie superficielle de la colonne d'eau, le deuxième sa partie centrale et le troisième la partie la plus profonde.

2.2.5 Les courants dans les petites retenues

Dans l'une des rares recherches sur les mouvements des eaux dans les petites retenues, Carlini (2006) a montré l'effet de l'ensemble des facteurs qui régissent l'hydrodynamique des milieux lenticulaires dans des étangs du Centre-Ouest de la France. Comme on peut le voir dans la figure 15, l'auteur a pu observer deux types de courants au sein des plans d'eau qu'il a examinés. Les courants les plus remarquables sont ceux de densité qui se forment grâce à l'action du tributaire et que Carlini appelle « courants hydrographiques ». Ils progressent dans la retenue suivant la direction de l'ancien lit du cours d'eau et, au fur et à mesure que l'inertie du tributaire se délaye, ils sont intégrés à la circulation propre du plan d'eau, c'est-à-dire dans les courants de dérive qui se forment à proximité de la zone lenticulaire ou dans les baies les plus éloignées du courant du tributaire. Ce dernier type de courant est donc bien présent dans les étangs, mais il est éphémère, ne durant que quelques jours dans le cas le plus extrême : cela est dû à la faible taille des cuvettes stagnantes, qui exposent les eaux dans une moindre mesure à l'action du forçage externe.

Figure 91 : Modélisation des courants de l'étang de Cieux entre 70 et 150 cm de profondeur, par vent de Nord
25 juillet 2003

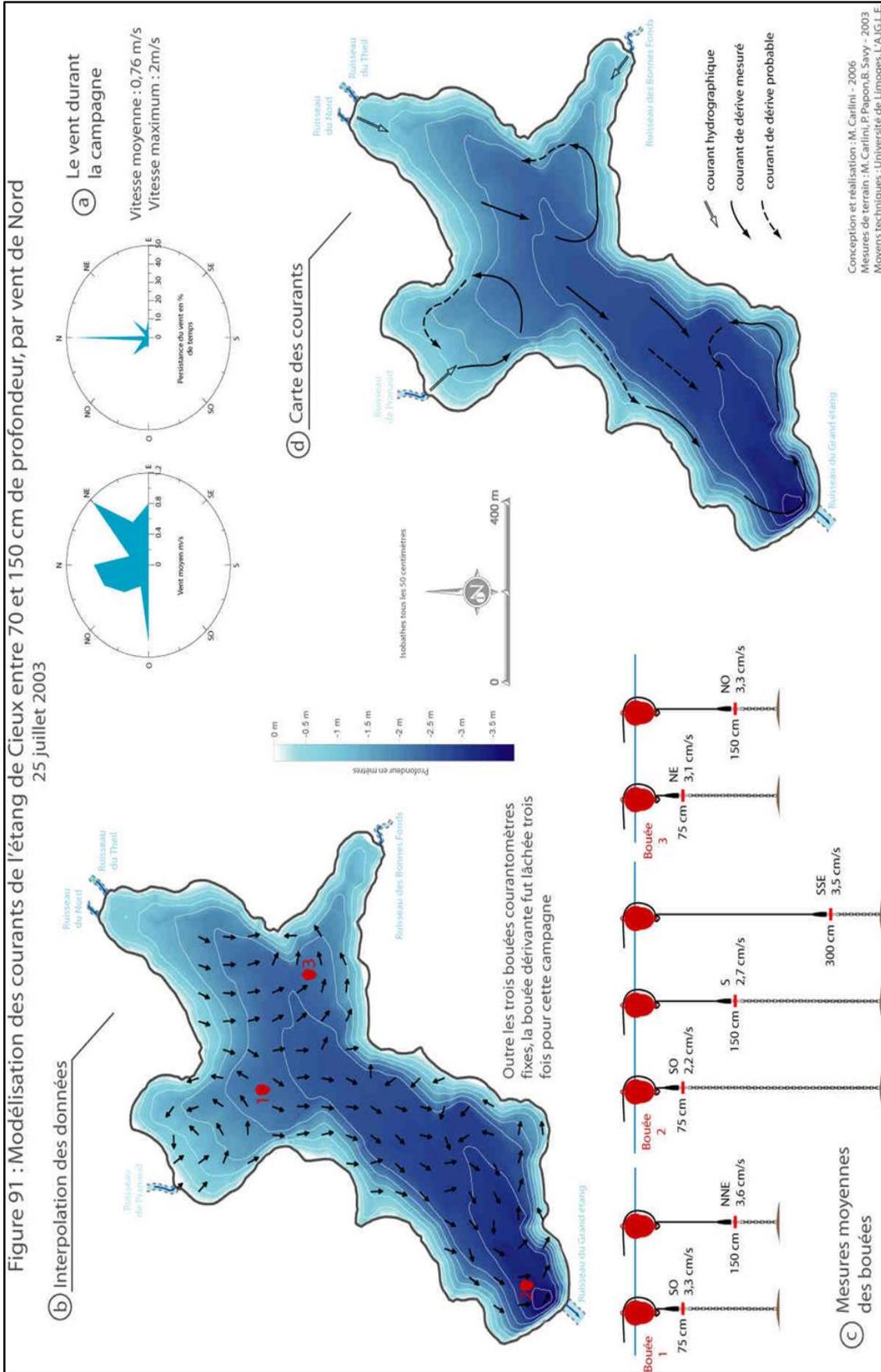


Figure 15 : En bas à droite de l'image, la carte des courants de l'étang de Cieux. Dans cette figure on peut également voir la méthodologie qui a servi pour la réalisation de cette carte (Source : Carlini, 2006).

2.3 Le fonctionnement sédimentaire des milieux lenticques

Comme pour les cours d'eau, le compartiment sédimentaire des plans d'eau aussi est strictement lié à leurs caractéristiques hydrodynamiques, qui en déterminent le fonctionnement. En raison de l'intermittence et de la magnitude changeantes de ces dernières, la dynamique des particules au sein des milieux lenticques est largement dominée par le phénomène de sédimentation, ce qui explique le fait que ce type d'environnement soit voué au comblement en des temps plus ou moins longs.

2.3.1 L'origine des sédiments des plans d'eau

Comme Campy & Meybeck (1995) l'expliquent, les particules que nous retrouvons au sein d'un plan d'eau ont une double origine : elles peuvent être allochtones ou autochtones. Le premier type de sédiment est composé de matériaux organiques et inorganiques, dont la nature est similaire à celle des particules qu'on retrouve dans les cours d'eau (cf. paragraphe 1.3). Justement, un des principaux convoyeurs de sédiments est le tributaire, qui déverse dans la cuvette sa charge sédimentaire. D'autres sédiments de type allochtone peuvent être transportés dans les plans d'eau par leurs fluctuations de niveau qui permettent d'arracher des particules au niveau de berges, par les vents qui transportent des poussières capables de se déplacer dans l'atmosphère pour de longs trajets ou par les eaux de ruissellement qui transportent des matériaux qui dérivent du lessivage des versants.

Le deuxième type de sédiments est composé principalement par des matériaux organiques, qui dérivent de l'altération de certaines substances de la part des organismes qui vivent dans le plan d'eau ou par l'accumulation de ceux-ci sur le fond une fois qu'ils sont morts. Des sédiments d'origine minérale peuvent aussi se former au sein de la cuvette et c'est notamment le cas des particules carbonatées qui se génèrent grâce à certaines propriétés chimiques de l'eau ou à certains phénomènes physiques, comme l'acidité ou l'évaporation. D'autres sédiments minéraux autochtones sont ceux qui se produisent grâce à la précipitation des sels minéraux, mais ils concernent principalement certains types de plans d'eau, comme les lacs d'eau salée.

2.3.2 La dynamique sédimentaire des plans d'eau

L'ensemble de ces particules se déplace suivant les mouvements des eaux qui se produisent dans les plans d'eau et qui en déterminent la dynamique sédimentaire, laquelle se manifeste à travers les processus d'érosion, de transport et de sédimentation comme dans les

milieux lotiques. Les caractéristiques de la dynamique sédimentaire des plans d'eau ont été décrites dans le détail par Håkanson & Jansson (1983), qui estiment que pour la comprendre pleinement il convient de l'aborder en subdivisant la cuvette en plusieurs secteurs, en fonction des différentes forces qui y agissent. Au niveau de l'embouchure avec le tributaire, les forces qui contrôlent la dynamique sédimentaire sont le courant du cours d'eau et le relatif courant de densité qu'il génère. Dans ce secteur, se produit une sédimentation active des particules, qui engendre la formation d'une des structures morphologiques les plus caractéristiques des plans d'eau : le delta. Il se présente en forme d'éventail et il est composé principalement de sédiments grossiers abandonnés par le tributaire, qui, au contact de l'eau contenue dans la cuvette, subit une brusque décélération, provoquant une réduction drastique de sa compétence. Au contraire, les sédiments plus fins continuent leur trajet poussés par le courant de densité et ils forment ce qui est communément appelé le « plume », une sorte de nuage de particules fines qui progresse vers le large (fig. 16). Donc, dans la partie centrale d'un plan d'eau, seuls les sédiments les plus fins arrivent, s'intégrant aux particules d'origine autochtone et formant ensemble la turbidité du plan d'eau. Ici, ce mélange de particules est pris en charge par les courants de dérive et de densité, qui les incluent dans la circulation interne au plan d'eau et les transportent vers leur lieu de sédimentation. Dans les milieux lentiques, ce phénomène est gouverné par les mêmes mécanismes que ceux qui régissent la charge en suspension des milieux lotiques : les particules flottent dans l'eau tant que la turbulence des courants peut soutenir leur poids, autrement elles chutent sur le fond. La vitesse de sédimentation est influencée par plusieurs facteurs, mais en règle générale elle est d'autant plus efficace que la colonne d'eau est faible et que le temps de séjour des eaux est long. Une fois sur le fond, les sédiments peuvent être érodés et réinsérés dans la circulation des eaux, qui peut les transporter vers un autre lieu de sédimentation. Dans ce cas aussi, ce phénomène est d'autant plus possible que la colonne d'eau est faible, car les forces qui le déterminent peuvent atteindre plus facilement le fond. Ainsi, on comprend que la dynamique sédimentaire des plans d'eau est subdivisée en deux phases : celle du transport primaire et celle du transport secondaire. Le premier concerne tous les processus qui déplacent les sédiments avant leur sédimentation et la deuxième concerne tous les processus qui convoitent les particules après leur sédimentation.



Figure 16 : Le plume de sédiments qui progresse dans l'étang de Baerenthal, un des terrains d'étude de cette recherche (Source : Geoportail.fr).

2.3.3 La dynamique sédimentaire dans les petites retenues

En raison de la faible magnitude et de la forte intermittence de leurs flux d'eau, les étangs sont particulièrement efficaces pour ce que concerne le piégeage des sédiments. Toutefois, les connaissances sur la dynamique sédimentaire de ces plans d'eau sont limitées (Banas, 2007) et souvent elles se basent sur les connaissances existantes sur le fonctionnement sédimentaire des lacs et des lacs de barrage. Ce qui est certain, c'est que dans ces petites retenues s'accumulent au fil du temps de grandes quantités de sédiments fins. En effet, le fond des étangs est généralement constitué d'un substrat imperméable, surmonté par un sol argilo-sableux, couronné à son tour par une épaisse couche de vase constituée principalement par des matériaux organiques (Dussart, 1992). Carlini (2006) a montré que l'épaisseur de cette couche peut être très importante, grâce à l'étude des étangs des Oussines et de Cieux (fig. 17). Dans le premier, elle atteint 1,15 mètre de profondeur et on distingue deux zones d'accumulation : une à l'amont due à la présence d'un ravin creusé par le tributaire qui s'est rempli de sédiments et une en aval à proximité de la digue. Dans le deuxième, elle atteint 1,10 mètre de profondeur et on distingue une seule zone d'accumulation située vers la sortie du plan d'eau, dans la zone lentique. En outre, l'auteur a mis en évidence la présence d'importantes quantités de matière organique, avec des taux qui atteignent les 20 % dans les parties centrales de ces deux retenues.

Figure 76 :
Cartes des épaisseurs de sédiments

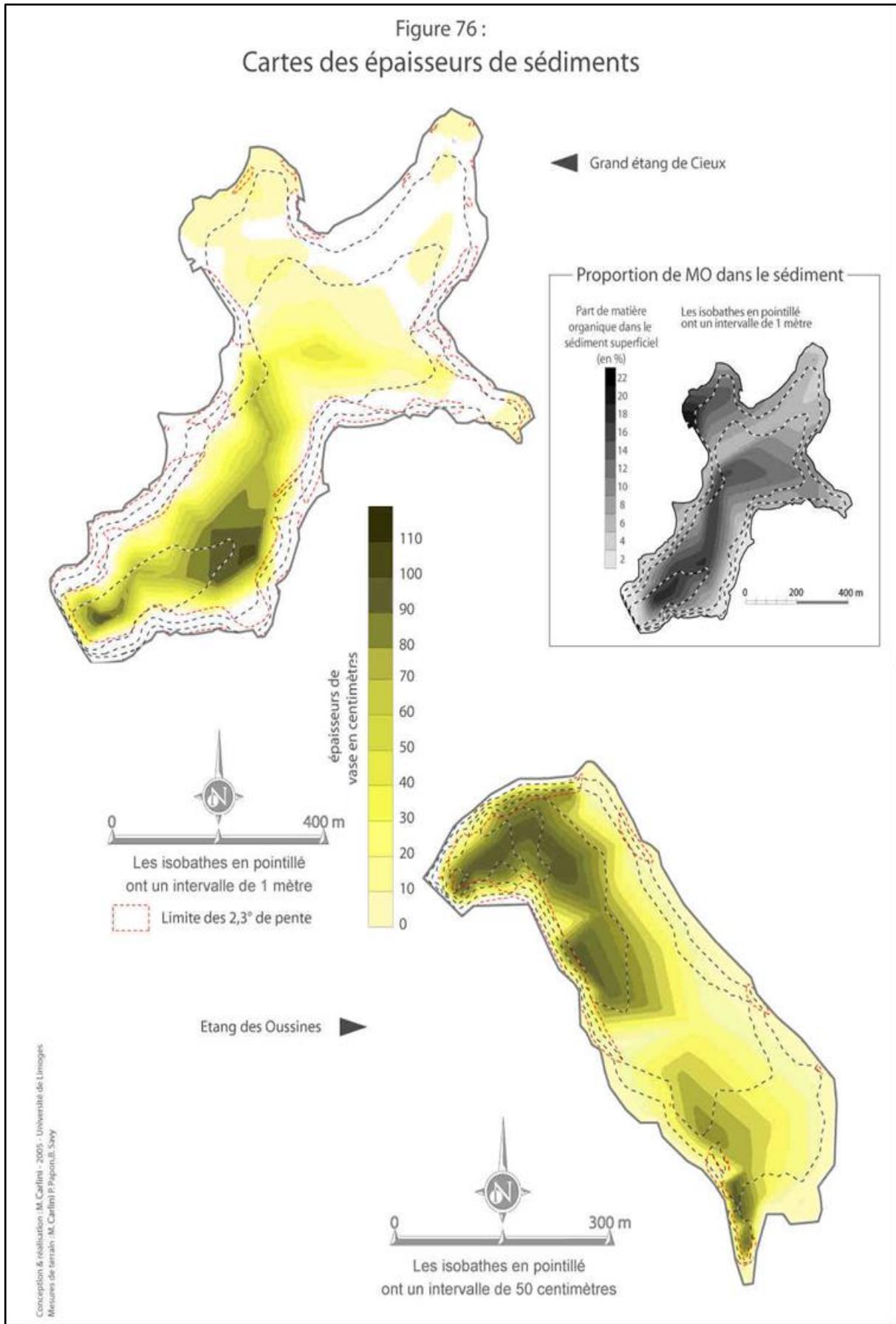


Figure 17 : La disposition de la vase dans les étangs de Cieux et des Oussines (Source : Carlini, 2006).

En observant la disposition de la vase au sein des deux plans d'eau, on déduit le tracé du lit de l'ancien cours d'eau. Cette disposition des sédiments est typique des retenues, dont la plupart des particules est apportée par le tributaire, qui les répand dans la cuvette grâce aux courants de densité qu'il génère. L'ancien talweg constitue alors la principale direction empruntée par le plume (fig. 17), qui se déplace vers l'aval de la cuvette suivant son parcours et déposant des particules de plus en plus fines pendant cette progression. À titre d'exemple, Olness & Rausch (1977), analysant la granulométrie de plusieurs échantillons de sédiments du lac de barrage américain Callahan, ont montré que :

- Au niveau de l'embouchure avec le tributaire, ils étaient constitués à 5 % de sables, pour 76% de limons et 19% d'argiles.
- Au niveau de la partie médiane de la retenue, ils étaient constitués à 1 % de sables, pour 61 % de limons et 38 % d'argiles.
- Au niveau de la partie terminale de la retenue, ils étaient constitués à 51 % de limons et à 49% d'argiles.

Ainsi, sur le fond des retenues, il est possible d'observer un gradient granulométrique entre l'amont et l'aval du plan d'eau, avec les particules les plus grossières qui se situent à proximité de l'embouchure avec le tributaire et les plus fines au barrage.

Dans ce chapitre, nous avons évoqué les lacs, les grandes retenues et les étangs, qui ont tous un fonctionnement abiotique de type lentique. Toutefois, derrière cette uniformité de façade se cachent de multiples aspects hybrides en lien avec le volume d'eau retenu ou le barrage d'une vallée faisant que l'aspect linéaire du cours d'eau barré est encore ressenti au sein du plan d'eau. Ces traits lotiques sont certes non dominants dans le fonctionnement de ces plans d'eau, mais ils mettent en évidence qu'une simplification outrancière des traits abiotiques lentiques conduirait à une mauvaise compréhension du milieu et donc de sa gestion. Mais si ces points existent au sein des plans d'eau, en lien notamment avec leur artificialité, n'en serait-il pas de même pour les cours d'eau ? Aussi, devons-nous questionner l'hybridité potamologique et replacer cet ensemble dans la géographie des écotones.

3. LES MILIEUX AQUATIQUES HYBRIDES

Les cours d'eau et les plans d'eau ne sont pas les seuls milieux qu'on retrouve le long d'un réseau hydrographique. En effet, en leur sein et tout autour, une multitude d'autres environnements aquatiques existe, lesquels entretiennent des relations avec les deux mentionnés plus haut à travers des occasionnels échanges d'eau, à titre d'exemple lorsqu'une rivière déborde dans son lit majeur. Dans la littérature scientifique, cette vision des espaces fluviaux prend le nom « d'hydrosystème » (Amoros & Petts, 1993). Quand on observe attentivement les caractéristiques de ces milieux « annexes », on s'aperçoit qu'ils ne peuvent pas être définis comme lotiques ou comme lentiques, étant particularisés par une sorte de mélange de ces deux types de fonctionnement : il s'agit d'environnement « hybrides ».

3.1 Les écotones

Ces milieux se développent notamment sur les marges d'unités spatiales relativement homogènes et dans la littérature scientifique ils prennent le nom « d'écotones ». Avant de passer en revue certains écotones qu'on retrouve communément au sein des hydrosystèmes, nous pensons qu'il est nécessaire de clarifier ce concept, le fonctionnement de ce type d'environnement étant particulièrement complexe. L'histoire de la conceptualisation de la notion d'écotone est très riche et elle reflète les innombrables points de vue qui existent pour aborder ces milieux. Comme Risser (1995) l'explique, ce terme est apparu au début du XX^{ème} siècle, quand les scientifiques naturalistes ont commencé à examiner les périphéries des milieux qu'ils étudiaient, mettant en avant les importantes propriétés de ces espaces, spécialement d'un point de vue biologique. À titre d'exemple, les biologistes spécialistes de la faune sauvage mirent en évidence les bénéfices que les animaux tiraient des environnements qui se trouvent à la rencontre de deux écosystèmes en termes d'habitat, nourriture, etc. De même, les botanistes découvrirent la grande variété d'espèces des lisières de forêts, alors que d'autres experts de la flore commencèrent à s'intéresser aux limites des biomes de la planète, notamment à celui entre la toundra arctique et la forêt boréale Nord-Américaine (*e.g.* Weaver & Albertson, 1956). Comme l'indiquent ces exemples, le terme « d'écotone » fut dans un premier temps une prérogative botanique. Toutefois, à partir des années 1970, d'autres sciences environnementales commencèrent à s'approprier des écotones, en adaptant la définition à leur domaine d'étude, comme la géographie. Ainsi, dans le cadre de cette recherche, nous adopterons la définition d'écotone formulée par Rougerie (2003), qui les désigne comme : « *un gradient menant d'un milieu à un autre, et de l'une à l'autre des biocénoses qui leur sont associées* ».

3.1.1 Le gradient environnemental

À notre avis, l'intérêt de cette définition réside dans le fait qu'elle met en avant le concept de « gradient environnemental », que le Dictionnaire d'Écologie et des Sciences environnementales (voir Ahad & Ferdous, 2019) définit comme : « *Un continuum de conditions qui varient entre deux extrêmes, comme peut l'être le passage entre un milieu chaud et un milieu froid* »¹⁷. En effet, comme cela se produit souvent dans les disciplines naturalistes quand on aborde les aspects non biotiques d'un milieu (Demangeot, 2016), ce gradient de conditions abiotiques qui caractérise les écotones passe souvent en second plan et il est mentionné uniquement pour justifier la grande diversité biologique de ces environnements. Pourtant, il constitue l'essence même des écotones et de leur fonctionnement. Quand deux biotopes se rencontrent, les forces qui les caractérisent ne cessent pas soudainement leur action, laquelle se délaye au fur et à mesure que les forces du milieu voisin prennent le dessus, entraînant la modification des flux de matière et énergie qu'elles accomplissent (Johnston, 1993). Il se crée ainsi un environnement dual, l'écotone, qui bénéficie des conditions des deux environnements en question et qui possède sa propre emprise géographique ainsi qu'un fonctionnement en constante évolution.

3.1.2 La complexe géographie des écotones

Ces caractéristiques font en sorte que la géographie des écotones est particulièrement complexe, rendant ces espaces particulièrement attractifs pour la Géographie physique qui étudie les phénomènes naturels dans l'espace et dans le temps. Comme plusieurs auteurs l'expliquent (*e.g.* Kolasa & Zalewski, 1995 ; Strayer et al., 2003), les limites entre deux milieux naturels ne sont jamais figées, mais elles se modifient constamment, suivant les fluctuations du gradient environnemental qui les caractérise : à tout moment, les forces d'un des environnements qui se rencontrent peuvent prendre le dessus, ne se contentant pas de modifier seulement le fonctionnement mais aussi la conformation de l'écotone. Ainsi, les limites de ces environnements marginaux sont des entités indéfinies (fig. 18) : ils peuvent présenter des dimensions considérables ou infinitésimales, leur extension peut être très grande ou très petite et leur morphologie peut présenter d'innombrables conformations différentes, pouvant être très complexe ou très simple, très nette ou très imprécise. En outre, ils peuvent être considérés à

¹⁷ Cette définition de gradients environnementaux a été traduite de l'anglais. L'originelle est la suivante : « *A continuum of conditions ranging between extremes, as the gradation from hot to cold environments* ».

n'importe quelle échelle spatiale, qui peut changer considérablement en fonction de la problématique que nous sommes en train d'aborder : à titre d'exemple, un écotone peut contenir en son sein une myriade d'écotones différents, les césures pour les habitats des organismes vivants divergeant d'une espèce à l'autre.

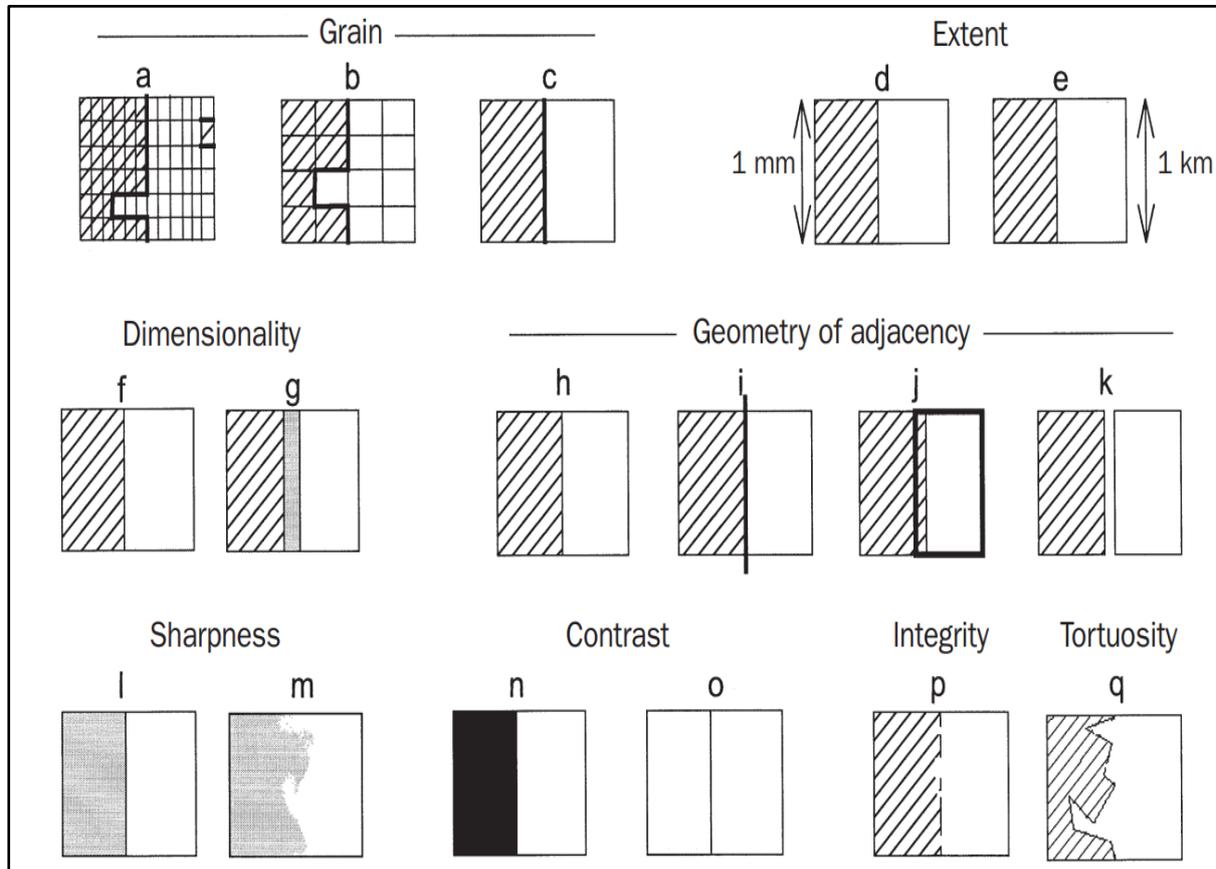


Figure 18 : Les différentes conformations que peuvent assumer les limites en nature (Source : Strayer et al. 2003).

3.2 Les écotones qui se développent le long des axes transversaux et verticaux des cours d'eau

Comme Ward & Wiens (2001) l'expliquent, les hydrosystèmes sont des espaces particulièrement idoine à la formation des écotones, grâce aux complexes échanges multidimensionnels, des gradients et de l'hétérogénéité qui les caractérisent. Comme nous pouvons le voir dans la figure 19, ils se développent le long des toutes les dimensions spatiales et dans ce contexte la notion d'écotone se complique ultérieurement. En effet, elle peut être étendue non seulement aux espaces de rencontre entre deux milieux différents mais aussi à la rencontre de deux parcelles d'un même milieu (Townsend & Hildrew, 1994). Particulièrement

emblématiques sont les environnements qui se développent le long des axes transversaux et verticales des fleuves et les rivières, souvent pris en exemple quand on parle d'écotones.

Bounding units	Ecotones	Spatial extent (m)	Predominant gradients
I. LONGITUDINAL DIMENSION			
Headwaters-Estuary	River Continuum	$\geq 10^6$	Organic Resources, Temperature
Freshwater-Marine	Zonal Transitions	10^3-10^4	Temperature, Oxygen, Hydraulics
	River Estuary	10^5	Salinity (surface water)
Parapotamon-Channel	Anchialine Caves	10^4	Salinity (ground water)
	Backwater	10^3	Temperature, Chemistry
Riffle-Pool	Confluence	10^2	Current, Food Resources
	Erosional/Depositional Transition	10^2-10^3	Current, Depth, substratum
II. LATERAL DIMENSION			
Channel-Canyon Wall	Riparian Zone (constrained)	10^1	Aquatic-Terrestrial (abrupt)
Channel-Upland	Fringing Flood Plain	10^3-10^5	Aquatic-Terrestrial (complex)
Pelagic-Shore	Littoral Zone (lake)	10^1-10^2	Macrophyte zonation, Depth
Channel-Ridge	Marsh/Swamp Wetlands	10^2-10^4	Substratum, Organic Detritus, Oxygen
Upland-Flood plain	Tributary Alluvial Fan	10^2	Slope, Substratum, Temperature
Channel-Tributary	Confluence	10^2-10^3	Current, Sediment, Substratum
Channel-Source	Springbrook	10^2	Temperature, Chemistry, Detritus
III. VERTICAL DIMENSION			
Aquifer-Channel	Downwelling/Upwelling Zones	10^1-10^2	Nutrients, Oxygen, Temperature
Aquifer-Springbrook	Source	10^0-10^1	Nutrients, Oxygen, Temperature
Aquifer-Riverbed	Hyporheic Zone	10^0	Nutrients, Oxygen, Temperature
Aquifer-Soil	Psammolittoral Zone	10^{-1}	Water Content, Oxygen, Temperature
Aquifer-Parapotamon	Anaerobic Sediment Layer	10^0	Redox Potential, nutrients

Figure 19 : Les différents types d'écotones qui se développent le long de l'axe transversale des fleuves et des rivières (Source : Ward & Wiens (2001)).

3.2.1 Les écotones qui se développent le long de l'axe transversal d'un cours d'eau

Comme Lévêque (1996) et Ward et al. (1999) l'expliquent, les écotones qui se forment le long de l'axe transversal d'un cours d'eau s'établissent à l'intérieur de ce qu'on appelle habituellement la « plaine d'inondation », un espace submersible très hétérogène qui forme la transition entre les zones qui sont constamment en eau et celles qui ne le sont jamais. Parmi ces écotones, on peut mentionner les ripisylves, les bras morts ou d'autres zones marécageuses qui se remplissent en eau pendant les crues (fig. 20). Comme on peut facilement le déduire, ces

environnements sont régis par un complexe gradient environnemental qui évolue au fil des saisons, au rythme des périodes de submersion et d'émersion.

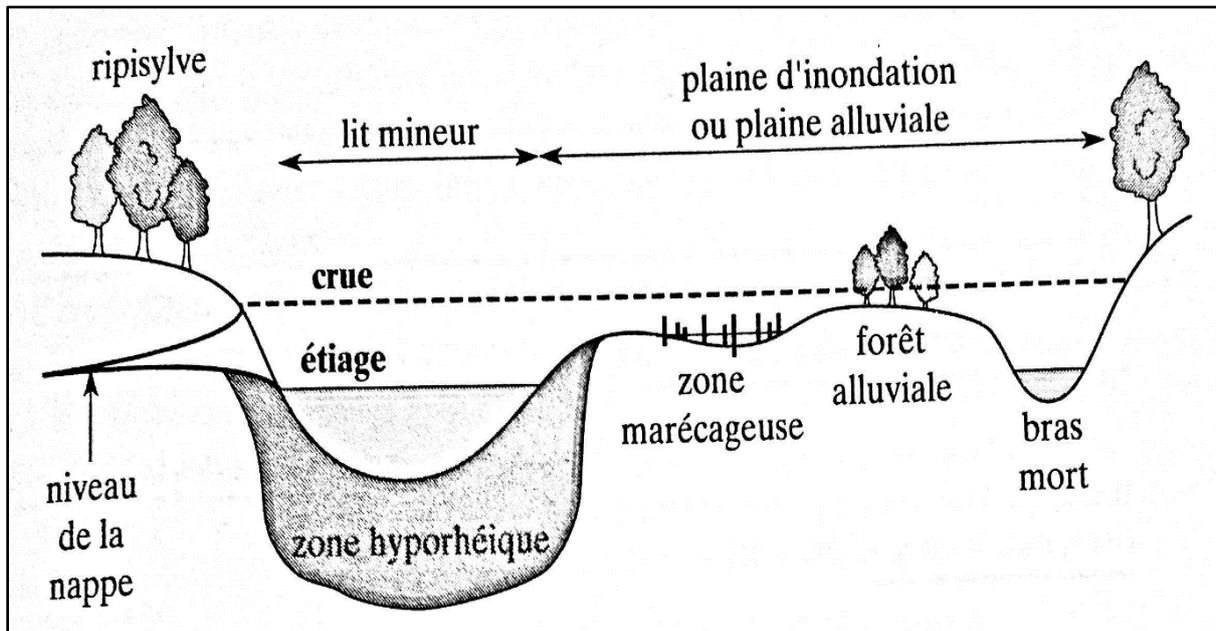


Figure 20 : Les différents types d'écotones qui se développent le long de l'axe transversale des fleuves et des rivières (Source : Lévêque (1996).

La plaine alluviale est donc le « royaume » des zones humides, qui probablement sont l'écotone par antonomase. Comme Holland et al. (1990) l'expliquent, elles se forment quand un milieu aquatique et terrestre se rencontrent et elles sont caractérisées par un gradient de conditions abiotiques qui amène graduellement des eaux aux terres. Toujours selon ces auteurs, en observant leur fonctionnement, on comprend comme nulle part ailleurs la modification des flux de matières et d'énergie qui se produisent dans les écotones. En effet, les zones humides fonctionnent comme une sorte de filtre, empêchant le passage de certains types de substances, qui sont ainsi piégées à l'intérieur de ces espaces. Un exemple de zone humide qui se développe transversalement au lit d'un cours d'eau sont les bandes de végétation qui bordent les rives des fleuves et des rivières. Comme Dufour & Rodríguez-González (2019) l'expliquent, elles peuvent être composées d'un grand nombre d'essences différentes et leurs extensions peuvent varier considérablement, pouvant être très larges ou très minces. La modification des flux perpétrée par ce type d'écotone peut influencer considérablement la dynamique d'un cours d'eau, modifiant les caractéristiques des écoulements dans le lit majeur, piégeant les sédiments, rechargeant la nappe phréatique, etc. (Dufour & Piégay, 2010; Piégay et al., 2003). De la même manière, elle accomplit un grand nombre de services écosystémiques, comme freiner l'énergie des crues, bloquer les substances polluantes, lutter contre l'érosion, etc. (Riis et al., 2020).

3.2.2 Les écotones qui se développent le long de l'axe vertical d'un cours d'eau

Les écotones qui se développent le long de l'axe vertical d'un cours d'eau se forment à l'interface eaux superficielles-souterraines et le gradient environnemental qui les caractérise reflète les complexes échanges qui existent entre ces deux types de milieux, ainsi que les innombrables variables qui les contrôlent (Gibert et al., 1997). Ils se développent dans les zones de contact entre le cours d'eau et son aquifère, comme la zone hyporhéique, c'est-à-dire les terrains gorgés en eau qui entourent les fleuves et les rivières (Ciabatti, 1982), les sources, les résurgences karstiques etc. Ces flux d'eau sont fortement influencés par la nature du substrat et ils sont particulièrement importants quand celui-ci est constitué de matériaux perméables, alors qu'ils deviennent plus faibles quand il est constitué de matériaux imperméables (Reggiori, 2008). Dans ces environnements, on y retrouve généralement ce qu'on appelle la « méiofaune », un cortège d'organismes benthiques capables de vivre dans les alluvions et de survivre aux gradients qui concernent plusieurs caractéristiques abiotiques de ces habitats, comme la granulométrie du substrat, l'épaisseur de celui-ci, la température, la profondeur de l'eau, les fluctuations des débits ou celles piézométriques, le niveau d'oxygène, la possibilité que la lumière a de pénétrer dans les sédiments (Schmid-Araya, 1997). Toutefois, ces espaces peuvent être également colonisés par d'autres types d'organismes benthiques, qui normalement vivent plus en surface et qui retrouvent dans l'interface eaux souterraines-superficielles une meilleure qualité physicochimique et une plus grande stabilité temporelle, rendant la diversité biologique de ces écotones particulièrement riche (Marmonier et al., 2019).

3.3 Les écotones qui se développent le long de l'axe longitudinal d'un cours d'eau

Comme nous l'avons mentionné plus haut, dans les fleuves et les rivières ils existent également des écotones qui se développent le long de l'axe longitudinal du cours d'eau, c'est-à-dire à l'intérieur de la même unité spatiale, le lit mineur, voire le chenal d'écoulement.

3.3.1 L'écotone cours d'eau

Les écotones qui se développent le long de de cette dimension apparaissent éphémères et leur appréciation change considérablement en fonction de l'échelle spatiale qu'on utilise (Naiman et al., 1988). À grande échelle, celle qui comprend une fleuve ou une rivière dans son intégralité, tout un cours d'eau peut être en quelque sorte assimilé à un grand écotone (Ward & Wiens, 2001). En effet, de ses sources jusqu'à son estuaire se développe un gradient environnemental qui concerne un grand nombre de traits abiotiques et à partir duquel plusieurs

auteurs ont essayé d'établir une zonation des cours d'eau¹⁸ (e.g. Huet, 1949; Vannote et al., 1980). À titre d'exemple, Illies & Botosaneanu (1963) divisent les fleuves et les rivières en trois secteurs différents, sur la base d'un gradient dynamique et thermique. Si on se focalise sur ce dernier aspect, le parcours d'une rivière peut être subdivisé en trois zones distinctes :

- Tout en amont on retrouve le crénal, la zone qui se développe en correspondance des sources, où la température de l'eau est plutôt fraîche, étant influencée par les eaux souterraines.
- Immédiatement après on retrouve le Rhithral, la zone qui se développe généralement sur les versants les plus abruptes d'un cours d'eau, où la température moyenne de l'eau s'atteste autour des 20 °C en été.
- Tout en aval on retrouve le Potamal, la zone qui se développe dans les fonds de vallée, où la température moyenne des eaux peut dépasser largement les 20 °C en été.

Même si les auteurs qui ont formulé cette division ne l'affirment pas expressément, nous pouvons supposer que le passage entre ces trois secteurs distincts ne se fait pas soudainement, mais graduellement et que parmi eux se développent des écotones. Le gradient amont-aval qui caractérise les cours d'eau étant tout d'abord un gradient d'énergie, nous pouvons supposer également que c'est dans les écotones fluviales qui change la compétence des fleuves et des rivières et qui se forment certaines zones de dépôt, comme les cônes de déjection qui se mettent en place quand un torrent se jette dans une vallée. De même, nous pouvons supposer aussi que les limites des écotones fluviales varient considérablement au fil des saisons et qu'ils soient plus ou moins évidents en fonction des hautes et des basses eaux. Or c'est exactement ce que nous observons dans un milieu aquatique de transition entre cours d'eau et océan, à savoir l'estuaire.

3.3.2 Les estuaires

Les estuaires constituent le point de rencontre entre les eaux douces et lotiques continentales et celles salées et lenticules marines. Ils sont caractérisés par des forts gradients

¹⁸ Cela est en quelque sorte point focal de l'approche contemporaine administrative européenne sur les cours d'eau puisque le concept d'hydroécotone (Andriamahefa, 1999) trouve son origine dans cette partition amont-aval des cours d'eau selon des gradients physiques et biologiques (les morphorégions de Béthemont et al., 1996, et les écotones d'Omernick, 1987).

environnementaux qui concernent plusieurs aspects abiotiques de ces espaces. Comme Barletta & Dantas (2016) l'expliquent, le plus remarquable est probablement celui de salinité, provoqué par le mélange ou le contact des eaux douces fluviales et de celles salées marines, un mélange qui rend saumâtres certaines eaux qu'on retrouve dans les estuaires cependant que des discontinuités subsistent. Le taux de sel dissout dans l'eau est contrôlé par plusieurs facteurs, dont les principaux sont l'évaporation et les apports en eaux du fleuve. À partir de l'interaction entre ces deux forçages et des phénomènes qui en découlent, Dyer (1979, 1997) subdivise les estuaires en trois catégories :

- Les estuaires positifs, où les apports d'eau douce sont plus importants que l'évaporation. Ici, les eaux sont plutôt douces et elles flottent sur une strate d'eau salée, avant de se mélanger graduellement à travers des mouvements verticaux, qui vont du bas vers le haut et qui engendrent un flux d'eau de surface, qui sort de l'estuaire.
- Les estuaires négatifs, où l'évaporation est plus importante que les apports en eau douce. Ici, l'évaporation fait augmenter la salinité des eaux de surface, qui plongent en profondeur, engendrant un flux d'eau qui sort de l'estuaire en profondeur.
- Les estuaires neutres, où l'évaporation et les apports en eau douce s'équivalent et où se met en place un régime de salinité statique.

Comme nous pouvons nous en douter, ces trois configurations d'estuaire ne sont pas figées dans le temps, mais elles évoluent au fil des saisons, suivant les fluctuations de l'évaporation et des apports en eau. À titre d'exemple, pendant l'été sera le premier facteur à dominer et à déterminer le type d'estuaire (estuaire négatif), alors que pendant l'hiver, durant les hautes eaux, sera le deuxième facteur à prévaloir (estuaire positif). Comme Lobry (2004) et Chaalali (2013) l'expliquent, ceux derniers résultent particulièrement importants, pour ce qui concerne la salinité d'un estuaire. La figure 21, qui se réfère à l'estuaire de la Gironde, montre justement cette influence : quand le débit du fleuve est très important l'estuaire est caractérisé par des eaux plutôt douces, alors que quand il est faible, les eaux marines sont libres de rentrer dans cet environnement, qui présente alors des eaux plutôt salées. Un phénomène qui peut à certains égards paraître similaire, bien qu'il soit de sens inverse, est celui qu'on appelle habituellement « mascaret », qui se produit dans certains estuaires pendant les marées les plus fortes : sous l'effet de ce phénomène, les ondes marines rentrent dans le fleuve sous forme d'une

vague, dont les dimensions dépendent de la conformation des fonds et de la largeur du chenal (Chanson, 2005, 2012). Comme Mateus & Baretta (2008) l'expliquent, les gradient de salinité ne est pas le seul à se développer sur l'interface eaux continentales-marines. En effet, il en existe d'autres qui concernent d'autres compartiments abiotiques de ces milieux, comme la température, l'oxygène dissout, la turbidité et la pénétration de la lumière dans l'eau, qui peuvent influencer considérablement la biocénose qui peuple ces écotones. Mais remontons le fil du cours d'eau et continuons à appréhender ce milieu lotique à une échelle de plus en plus grande.

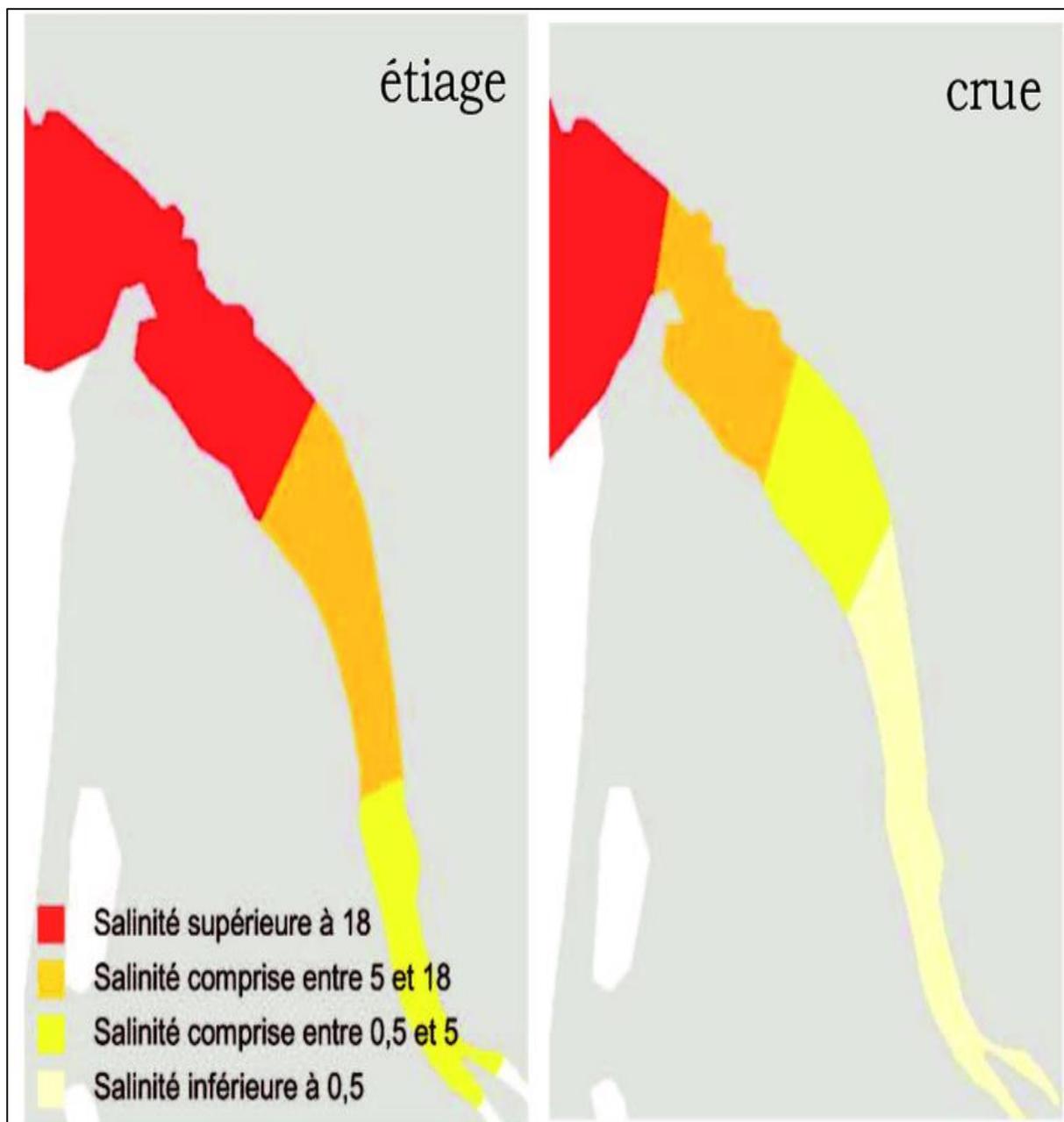


Figure 21 : Le gradient de salinité de l'estuaire de la Gironde, sous l'effet du cycle crue-étiage (Source : Lobry, 2004).

3.3.3 Les mouilles

À grande échelle cartographique, l'uniformité du milieu abiotique qu'est le chenal n'est qu'illusion. En effet, il existe au sein de l'axe longitudinal des cours d'eau une multitude d'habitats distincts, liés entre autres à la morphologie du chenal et à son profil en long. L'écotone se rapprochant le plus de la question de la retenue de seuil concerne évidemment son homonyme naturel (le seuil) qui s'oppose à la mouille. Morphologiquement, cette distinction est identifiable par une succession de convexités (les seuils) et de concavité (les mouilles) qu'on retrouve communément au sein du lit des cours d'eau, notamment dans ceux caillouteux (fig. 22). Comme Charlton (2008) l'explique, les causes à l'origine de ces faciès ne sont pas encore très claires de nos jours et plusieurs théories à ce sujet existent, lesquelles interpellent les phénomènes les plus disparates. Ce qui est certain, c'est qu'elle se trouve au sein d'un gradient d'énergie, identifiable concrètement par les eaux turbulentes des seuils et celles plus calmes des mouilles (Yang, 1971).

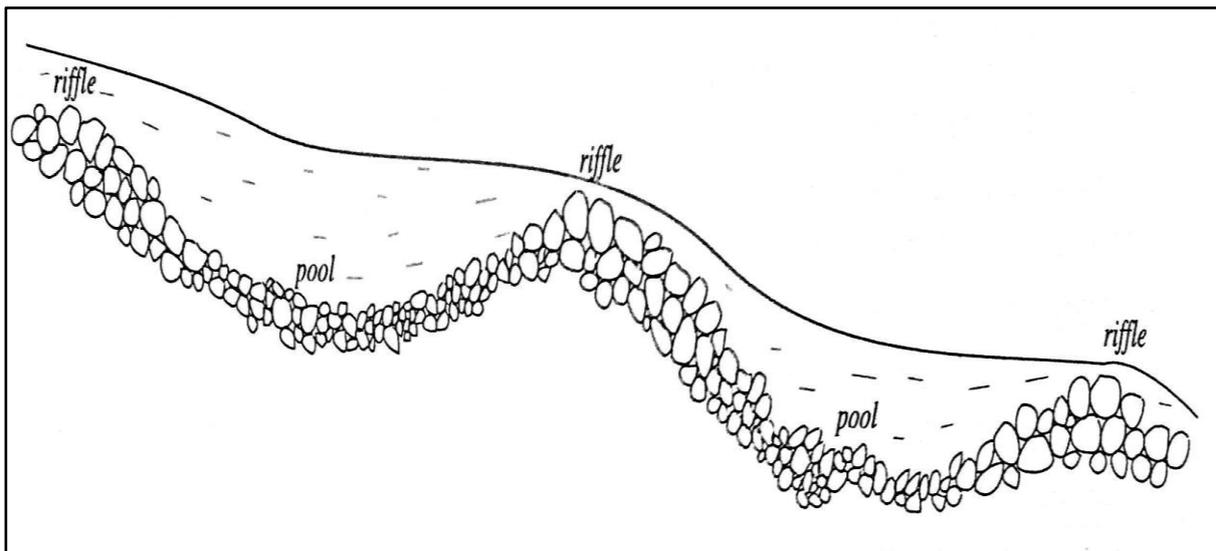


Figure 22 : La succession seuil-mouille, dans la figure respectivement riffle-pool (Source : Marchetti, 2000).

Dans ces dernières, le gradient énergétique engendre des conditions environnementales particulières, croisant à la fois des traits lotiques et lenticques. En effet, comme plusieurs études l'ont démontré, dans cet environnement, il est possible que la colonne d'eau du cours d'eau arrive à se stratifier. À titre d'exemple, Nielsen et al., (1994) ont observé une différence de température entre la surface et le fond d'une mouille de l'ordre de 3-9 °C, alors que Matthews et al. (1994) ont mesuré une différence thermique d'environ 4 °C entre ces deux mêmes extrêmes. Cet environnement devient alors particulièrement apprécié par certaines espèces de poissons qui aiment les eaux plutôt calmes et ils deviennent des zones de refuge pendant l'été

pour d'autres espèces particulièrement sensibles à la chaleur (Bilby, 1984 ; Ebersole et al., 2003 ; Elliott, 2000 ; Ozaki, 1988). Dans ce cas aussi, ce gradient n'est pas constant dans le temps, mais il évolue au fil des saisons : il est particulièrement fort pendant les basses eaux, alors que pendant les hautes eaux il est très faible, quand la succession mouille se trouve submergée par les débits plus forts (Charlton, 2008).

CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE

Cet état de l'art à propos des milieux aquatiques continentaux nous a permis de comprendre comment ils fonctionnent et comment les trois compartiments abiotiques au centre de cette étude se présentent en leur sein. Si, comme l'affirme notre hypothèse de départ, les seuils en rivière transforment les cours d'eau en plans d'eau, alors à l'amont de ces ouvrages il sera possible d'observer :

- Du point de vue hydrodynamique, des courants qui se déplacent de l'amont vers l'aval suivant le lit du tributaire qui alimente la retenue, des courants de dérive pluridirectionnels et des temps de séjour des eaux plutôt longs, qui dépassent l'échelle diurne.
- Du point de vue sédimentaire, une compétence des eaux nulle et une épaisse couche de particules qui recouvre les fonds, dont la granulométrie des particules qui la composent devient de plus en plus fine au fur et à mesure qu'on procède vers l'aval et dont le taux de matières organiques est particulièrement élevé.
- Du point de vue thermique, des stratifications thermiques de la colonne d'eau courtes, mais qui au cours des périodes les plus chaudes ou les plus froides de l'année peuvent durer pendant plusieurs jours d'affilée.

Au contraire, si les seuils en rivière ne transforment pas les cours d'eau en plans d'eau, alors à l'amont de ces ouvrages il sera possible d'observer :

- Du point de vue hydrodynamique, un écoulement unidirectionnel qui suit la pente du lit du tributaire et des temps de séjour des eaux plutôt courts, qui ne dépassent pas l'échelle diurne.
- Du point de vue sédimentaire, une compétence de l'écoulement telle de pouvoir toujours évacuer une charge.
- Du point de vue thermique, une colonne d'eau qui présente la même température à toutes les profondeurs et des températures de l'eau étroitement liées au cycle jour-nuit.

Cet état de l'art nous apprend également que la simple opposition cours d'eau-plan d'eau pourrait se relever trop simple et approximative pour apporter une réponse à la problématique de cette recherche, car il existe des espaces qui croisent en même temps des traits lotiques et lentiques : les écotones. Cette observation est particulièrement évidente quand on considère les

stratifications thermiques instables qui le caractérise ou que les tributaires qui l'alimentent engendrent un courant dominant qui se déplace dans la direction de leur ancien lit. Dans ce sens, particulièrement éloquent est la phrase de Touchart (2007a), qui à propos des étangs affirme que : « *ils sont plus stagnants que le cours d'eau, mais moins que le lac et c'est cette hybridation qui ferait sa spécificité* ». Sur la base de ces considérations, la question que nous nous posons est alors la suivante : si ce fonctionnement mi-lotique et mi-lentique existe à l'amont d'une chaussée d'étang, pourquoi ne pourrait-il pas exister à l'amont d'un seuil en rivière ? Bien que sur les papiers différents, ces deux types d'ouvrages engendrent un rehaussement de la ligne d'eau et le ralentissement du courant. Nous pensons alors que pour atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés, on ne peut pas se limiter à la simple quête d'indices de « loticité » ou de « lenticité », mais qu'il est nécessaire de pourchasser aussi des indices d'hybridité. Cela est une confirmation supplémentaire de la nécessité de prendre comme milieu lentique de référence les étangs et nous suggère le *modus operandi* vis-à-vis des retenues de seuil, qui convient d'examiner comme ces petites retenues.

II^{ÈME} PARTIE :

**L'ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES ABIOTIQUES DE TROIS
RETENUES DE SEUIL**

INTRODUCTION À LA DEUXIÈME PARTIE

Après avoir clarifié quels sont les éléments qui lui permettent de différencier les milieux lotiques des milieux lentiques, le scientifique qui veut apporter une réponse à la controverse sur la nature des espaces qui se forment à l'amont des seuils en rivière peut désormais élaborer une démarche qui lui permet d'étudier, ou plutôt de discerner, l'effet que ces ouvrages exercent à leur amont. À ce propos, les éléments mis en évidence au cours des chapitres précédents se révèlent très utiles : pas seulement ils nous indiquent comme les trois compartiments abiotiques au centre de cette étude se présentent dans les milieux lotiques et lentiques, mais également ils nous montrent l'existence d'une possible troisième réponse à la problématique de cette recherche, celle de l'hybridité. Ainsi, en accord avec notre hypothèse de départ, cela nous pousse à aborder les retenues de seuil comme s'il s'agissait à tous les égards de plans d'eau et plus précisément comme s'il s'agissait d'étangs, qui dès le départ nous utilisons comme milieux lentiques de « référence ». En effet, le fonctionnement lentique de ces petites retenues est décalé par la conservation de certaines caractéristiques lotiques du tributaire qui les alimente. Donc, en étudiant les retenues de seuil comme des étangs, non seulement nous pouvons observer l'existence d'un éventuel fonctionnement lentique, mais aussi l'existence d'un éventuel fonctionnement hybride.

Ainsi, nous consacrerons cette deuxième partie de la thèse à la présentation des techniques que nous avons adoptées au cours de la recherche pour étudier les retenues de seuil et des résultats qu'elles nous ont permis d'obtenir. Elle se compose de trois chapitres :

- I. Dans le premier, nous illustrerons en détail la méthodologie et les instruments que nous avons utilisés pour collecter et analyser les données nécessaires pour apporter une réponse à la problématique. Au cours de ce chapitre, nous présenterons les différentes options dont nous disposons pour analyser les retenues de seuil et nous justifierons le choix des méthodes que nous avons utilisées.
- II. Dans le deuxième, nous présenterons les terrains d'étude où la méthodologie a été appliquée. Plus précisément, nous aborderons les aspects infrastructureux et environnementaux qui les caractérisent et qui nous les ont fait choisir et, pour certains d'entre eux, nous nous aborderons également leurs caractéristiques historiques qui s'avèrent être dignes d'intérêt.
- III. Dans le troisième nous présenterons les résultats de façon « brute », c'est-à-dire comme ils sont sortis de nos analyses, thème par thème et site par site. Tout

d'abord, nous présenterons les résultats du volet thermique de l'étude, ensuite ceux du volet hydrodynamique et pour finir ceux du volet sédimentaire.

Pour mettre en place la méthodologie, nous nous sommes basés sur d'anciens travaux de Limnologie stagnustre qui ont traité des thématiques similaires à la nôtre. Le manuel « Limnologie physique et dynamique » de Laurent Touchart (2002), a été particulièrement important au cours de cette phase, car il consacre un grand nombre de pages aux différentes méthodes qui existent pour étudier les phénomènes des plans d'eau. En revanche, pour caractériser les terrains d'étude nous avons utilisé principalement les nombreuses informations que les propriétaires ou les gestionnaires nous ont fournies au cours de nos visites et les connaissances que nous avons acquises au cours des quatre années de thèse. Pour particulariser les aspects environnementaux des différents sites, nous avons également fait usage de certains ouvrages qui décrivent les aspects physiques de la France métropolitaine, comme ceux climatologiques.

Comme tout travail scientifique exécuté en dehors d'un laboratoire, c'est-à-dire qui n'est pas réalisé dans un environnement contrôlé, la méthodologie que nous avons mis en place pour étudier les retenues de seuil a dû se confronter à certaines causes de force majeure, à certains aléas qui nous ne pouvions pas contrôler et qui en ont en quelque sorte limité les performances. Dans notre cas, il s'agit de dysfonctionnements des outils que nous avons utilisés, des crues qui ont entraîné la perte de certains instruments et de l'épidémie de COVID 19 qui a empêché tout type d'échantillonnage pendant une longue période. Ainsi, le troisième chapitre sera également l'occasion pour présenter les difficultés que nous avons rencontrées au cours de cette recherche et la manière dont nous avons tenté de les surmonter.

1. LA MÉTHODOLOGIE UTILISÉE POUR ÉTUDIER LES CARACTÉRISTIQUES ABIOTIQUES DES RETENUES DE SEUIL

En accord avec notre hypothèse de départ et avec les éléments ressortis au cours de la première partie de cette recherche, nous avons estimé convenable d'établir une méthodologie qui nous permette d'étudier les retenues de seuil comme s'il s'agissait à tous les effets d'étangs situés sur cours d'eau. En effet, s'il est vrai qu'ils transforment les cours d'eau en plans d'eau, on peut supposer que le fonctionnement lentique des espaces qui se trouvent à l'amont des seuils en rivière soit plutôt similaire à celui de ces petites retenues qu'à celui des grands lacs naturels ou artificiels. Toutefois, pour pouvoir procéder de cette manière, nous avons dû tout d'abord résoudre un problème majeur : celui de la délimitation du terrain d'étude. En effet, si la zone située sous l'effet d'une chaussée d'étang coïncide avec l'espace situé entre cet ouvrage et le plan d'eau qui se forme à son amont, ce n'est pas le cas pour la zone située sous l'effet d'un seuil en rivière, dont la limite amont est beaucoup moins évidente, une retenue de seuil n'étant pas identifiable par un débordement dans le lit majeur. Ainsi, l'effet d'un seuil en rivière étant de rehausser la ligne d'eau d'un cours d'eau et de ralentir la vitesse de l'écoulement, pour border une retenue de seuil, nous avons utilisé la technique suivante :

- Initialement, nous avons sélectionné un tronçon de cours d'eau homogène, c'est-à-dire compris entre le seuil en rivière étudié et un autre ouvrage, un brusque changement de la morphologie du lit, etc.
- Ensuite, nous avons placé dans ce secteur quinze transects équidistants, faisant coïncider le quinzième avec le seuil en rivière. Sur ceux-ci nous avons mesuré la profondeur de l'eau, la vitesse de l'écoulement ou seulement un de ces paramètres s'il n'était pas possible de quantifier les deux. Dans le cas d'une confluence, c'est-à-dire d'une retenue de seuil à plusieurs bras, cette opération doit être réalisée dans les deux lits qui se rejoignent.
- Pour finir, nous avons rentré dans un graphique cartésien avec un double axe des ordonnées les données de vitesse et profondeur ainsi collectées, afin de matérialiser avec le point où les deux courbes se croisent la limite amont de la retenue de seuil¹⁹.

¹⁹ Dans le prochain chapitre de cette partie, lequel sera dédié à la présentation des terrains d'étude, seront insérées des figures qui matérialisent les résultats de cette procédure : il s'agit des figures 32, 36 et 43.

Dans les retenues de seuil délimitées de cette manière, nous avons déployé toute une série de procédés typiquement limnologiques, qui nous ont consenti d'étudier la direction des flux d'eau ainsi que leur compétence sédimentaire, les caractéristiques des fonds et le fonctionnement thermique de la colonne d'eau. À cet aspect a été consacrée une grande attention, qui a été mise au centre de notre démarche, car il apparaît crucial pour pouvoir établir si les seuils en rivière transforment ou non les cours d'eau en plans d'eau. En effet, comme l'affirment un grand nombre d'auteurs (*e.g.* Bettinetti et al., 2007 ; Touchart, 2002, 2007a ; Wilhelm, 1960), la stratification thermique est le seul phénomène qui permette de différencier avec certitude et sans aucune ambiguïté un milieu lentique d'un milieu lotique.

1.1 Les techniques utilisées pour étudier le fonctionnement thermique d'une retenue de seuil

En Limnologie, pour étudier le fonctionnement thermique de la colonne d'eau, plusieurs solutions existent et les plus communes sont celle du profilage et celle du mouillage (Touchart, 2002). La première consiste dans l'immersion d'un profileur de température le long d'une verticale et la deuxième dans la fixation de plusieurs sondes de température à un support capable de rester debout dans l'eau. Les deux présentent des bénéfices et des inconvénients. Celle du profilage permet d'avoir une bonne couverture spatiale du terrain d'étude mais une mauvaise couverture temporelle qui obligerait un opérateur à se déplacer sur le terrain constamment, chose qui généralement a lieu uniquement au cours des heures ouvrables. En revanche, celle du mouillage permet d'avoir une bonne couverture temporelle du site d'étude si on déploie des sondes capables de fonctionner de manière autonome, mais une mauvaise couverture spatiale, posant également le problème de la représentativité du point d'échantillonnage. Pour cette recherche, nous avons opté pour la deuxième méthode, étant intéressés d'avantage par l'évolution des phénomènes thermiques de la colonne d'eau dans le temps, plutôt que dans l'espace ; en outre, en raison des faibles dimensions qui présentent généralement les retenues de seuil, nous pouvons supposer que cette variable évolue faiblement d'un point de vue spatial. Cela nous a amené à positionner à l'amont des seuils en rivière des dispositifs habituellement appelés « chaînes de thermomètres ».

1.1.1 Les chaînes de thermomètres

Selon (Touchart, 2001) l'explique, cet outil est constitué d'une chaîne en acier inoxydable, dont une extrémité est fixée à une bouée qui lui permet de flotter et de suivre les

fluctuations du niveau d'eau et l'autre à un poids qui l'empêche de dériver. Dans notre cas, nous avons disposé dans les retenues de seuil des chaînes dont le diamètre des mailles était de 25 mm et des bouées dont le diamètre était de 25 cm ; pour les ancrer au fond, ont été utilisés des gros parpaings d'environ une vingtaine de kilos (fig. 23). Sur chaque chaîne, des thermomètres de type « HOBO water temp Pro V2 - U22-001 » (dont la précision est de $\pm 0,21^{\circ}\text{C}$ et la résolution de $0,02^{\circ}\text{C}$) ont été accrochés grâce à du fil en acier inoxydable. Il s'agit de capteurs enregistreurs capables d'emmagasiner des données en continu pendant de très longues périodes, en fonction de la cadence d'échantillonnage. Dans notre cas, les thermomètres ont été programmés pour mesurer la température de l'eau toutes les soixante minutes, comme dans Touchart (2007b) et Choffel (2019). Au cours d'études thermiques réalisées dans des étangs²⁰, ces mêmes auteurs placent un thermomètre tous les 25 cm le long des chaînes, mais dans les retenues de seuil cet intervalle n'est pas toujours adapté en raison de leur profondeur, généralement plus faible. C'est pourquoi le nombre et la profondeur des sondes ont été établis au cas par cas, prenant en compte les conditions hydrologiques de chaque terrain d'étude et veillant à laisser une marge entre le parpaing et le dernier capteur, afin d'éviter le plus possible que celui-ci touche le fond et soit recouvert par des sédiments.



Figure 23 : Les chaînes de thermomètres que nous avons utilisée dans les retenues de seuil (à gauche). Les thermomètres « HOBO U22-00 » immergés dans l'eau (à droite) (Photos réalisées par Francesco Donati,

²⁰ Une technique similaire a déjà utilisé dans des retenues de seuil en rivière dans le cadre d'étude réalisées en Australie (e.g. Bormans et al., 1997; Turner & Erskine, 1997).

1.1.2 Le traitement des données thermiques collectées par les chaînes de thermomètres

Afin de déterminer si des stratifications thermiques se mettent en place dans la colonne d'eau, le gradient thermique vertical, ainsi que le delta thermique (Δ°) ont été calculés. Ce dernier paramètre matérialise la différence qui existe entre la température mesurée par le thermomètre le plus en surface et celle mesurée par les thermomètres sous-jacents. Il a été considéré que :

- Si $\Delta^\circ = 0$, alors la colonne d'eau est homotherme.
- Si $\Delta^\circ \geq 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ou $\Delta^\circ \leq - 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$, alors la colonne d'eau est stratifiée.
- Toute valeur rentrant dans la marge d'erreur du thermomètre est égale à 0, donc la colonne d'eau sera considérée homotherme.

La temporalité des stratifications thermiques a été déterminée à partir du Δ°_{\min} journalier, qui rend compte de la différence thermique minimale entre la surface et le fond de la colonne d'eau au cours d'une journée : si $\Delta^\circ_{\min} = 0$, alors cela signifie qu'aucun cycle complet de stratification thermique n'a eu lieu. Ainsi, la durée moyenne journalière des périodes d'hétérogénéité et le pourcentage mensuel de celles-ci ont pu être calculés, afin de connaître leur évolution au cours des saisons. Pour avoir une ultime confirmation de la présence de strates d'eau distinctes au sein de la colonne d'eau, l'amplitude thermique journalière à chaque profondeur a été calculée, en faisant la différence entre la température maximale et minimale de l'eau au cours d'une journée. Si une stratification thermique est en place, cette valeur sera différente dans les diverses couches d'eau, dans le cas contraire, elle restera uniforme de la surface vers le fond.

1.2 Les techniques utilisées pour étudier le fonctionnement hydrodynamique d'une retenue de seuil

En Limnologie, pour étudier les trajectoires empruntées par les flux d'eau, leur vitesse et le débit du tributaire d'un plan d'eau, deux types de techniques sont utilisées : les statiques et les dynamiques (Touchart, 2002). Les premières prévoient l'utilisation d'un courantomètre ou des tubes de Pitot et Bentzel et les deuxièmes le déploiement d'objets dérivants, l'analyse des caractéristiques physico-chimiques de l'eau ou l'insertion de traceurs dilués dans le plan d'eau. Dans le cadre de cette recherche, nous avons opté pour une technique de type statique, basée sur l'utilisation d'un courantomètre. Ce choix repose sur le fait que ce genre d'instrument

est relativement simple à utiliser et il est polyvalent, permettant de mesurer en même temps les trois paramètres hydrodynamiques cités plus haut.

1.2.1 Le courantomètre « FlowTracker 2 »

Le courantomètre qui a été utilisé est le « FlowTracker 2 » (fig. 24), qui échantillonne les caractéristiques d'un flux d'eau (avec une précision de 0,0025 m/s et une résolution de 0,001 m) au moyen d'une onde acoustique dont la fréquence est de 10 MHz. Il possède une spécificité qui le rend particulièrement adapté à notre recherche : sa capacité à mesurer la direction d'un courant. En effet, quand on réalise un jaugeage à partir d'un courantomètre, il est nécessaire que le capteur qui effectue la mesure soit orienté le plus parallèlement possible au flux d'eau qu'on est en train d'analyser. Généralement, cette opération est effectuée visuellement, en observant la direction que l'eau emprunte par rapport au ruban gradué qu'on étale normalement entre les deux berges quand on effectue ce type d'échantillonnage. Étudiant l'écoulement en deux dimensions, le FlowTracker 2 est capable de déterminer l'angle qu'un flux d'eau présente quand il touche le capteur, indiquant ainsi à l'opérateur de manière très précise la direction du courant qu'il est en train de jauger (fig. 25). Il désigne ce paramètre sous le nom « d'angle de vitesse » et il l'enregistre comme un angle orienté : à titre d'exemple, si le courantomètre mesure un angle de vitesse égal à 0° , alors le courant est parfaitement parallèle (Xylem, 2019).



Figure 24 : Le FlowTracker 2 (Source : Sontek).

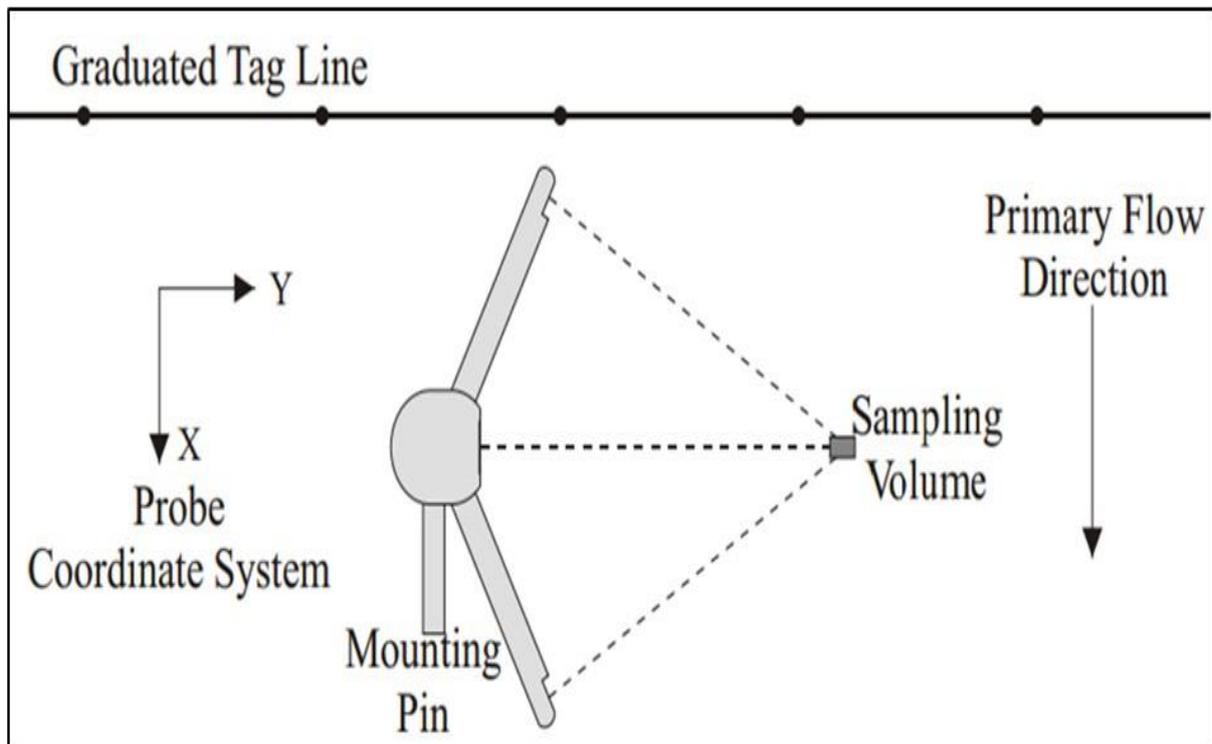


Figure 25 : La méthode d'échantillonnage de la direction de l'écoulement du FlowTracker 2 (Source : Xylem, 2019).

1.2.2 Méthodologie d'échantillonnage des caractéristiques hydrodynamiques d'une retenue de seuil

Au total, les paramètres hydrodynamiques qui ont été analysés grâce au FlowTracker 2 sont au nombre de trois : la direction des courants, leur vitesse et le débit qui alimente la retenue de seuil. Les deux premiers paramètres ont été mesurés sur plusieurs verticales situées à proximité des berges et au centre de la retenue de seuil, en utilisant une fonction du courantmètre expressément conçue à cet effet. Comme on l'a annoncé au début de ce chapitre, chaque terrain d'étude a été préalablement divisé en 15 transects également espacés et c'est sur ceux-ci que la vitesse et la direction de l'écoulement ont été mesurés. Le nombre de points de mesure à positionner sur chaque verticale, ainsi que leur profondeur ont été établis automatiquement par le courantmètre, sur la base du tirant d'eau que nous lui avons indiqué. Le dernier paramètre a été mesuré en utilisant la technique d'exploration du champ de vitesse décrite par Le Coz et al. (2011), qui consiste à placer un certain nombre de verticales le long d'un transect, où on mesure la vitesse du courant dans plusieurs points situés à des profondeurs différentes (fig. 26). Dans ce cas aussi, la profondeur et le nombre de points nous ont été fournis directement par le courantmètre, en fonction du tirant d'eau que nous lui avons indiqué.

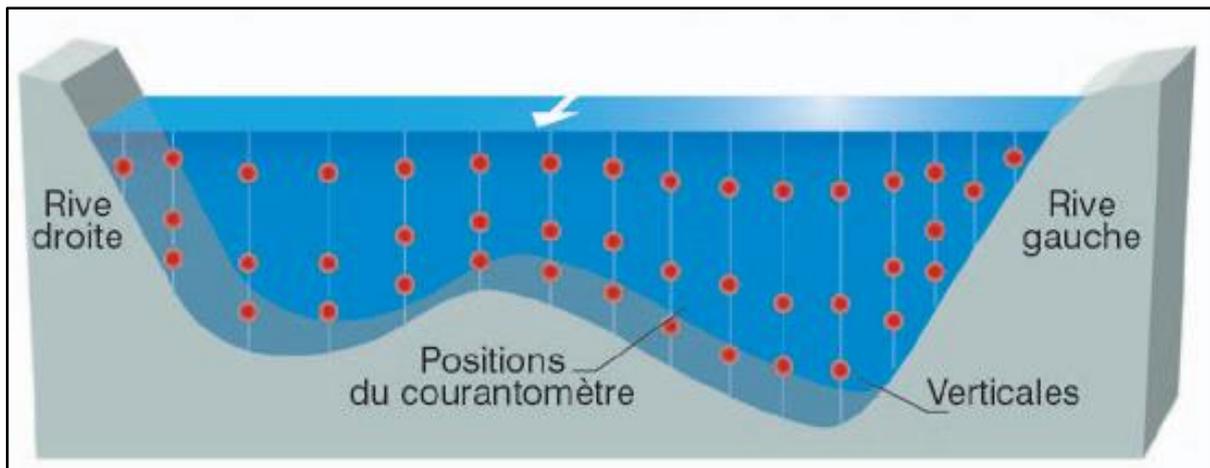


Figure 26 : La conformation d'une station de mesure pour la mesure du débit grâce à la technique d'exploration du champ de vitesse (Source : Le Coz et al., 2011)

1.2.3 L'analyse des données hydrodynamiques

Pour déterminer la direction des courants, l'angle orienté enregistré par le Flowtracker 2 a été examiné. Après chaque campagne de mesure, l'angle de vitesse moyen de chaque transect a été calculé : à partir de cette valeur, l'angle de vitesse moyen pour chaque transect pendant toute la période d'étude, a été chiffré. Pour matérialiser la direction du courant, un système de vecteurs orientés a été créé, qui reproduit fidèlement les observations réalisées sur le terrain et qui se base sur le principe du cercle trigonométrique. Dans un cercle trigonométrique l'orientation des angles est définie en fonction de leur sens de rotation, qui est négatif quand il s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre et positif quand il s'effectue dans le sens contraire. Le système de vecteurs orientés que nous avons mis en place se compose de quatre cadrans, où le centre représente la position du capteur du courantomètre pendant la mesure (fig. 27). Sur la base des indications fournies par le constructeur du FlowTracker 2, il a été orienté de sorte que :

- L'angle de 0° vise l'amont de la retenue de seuil.
- L'angle de -90° vise la berge gauche.
- L'angle de $\pm 180^\circ$ vise l'aval.
- L'angle de 90° vise la berge droite.

L'angle de vitesse moyen pour chaque transect pendant toute la durée de l'étude a été inséré dans ce système au moyen d'un vecteur qui pointe dans la direction d'où provient le courant. À titre d'exemple, un vecteur dont l'angle est de 30° matérialise un courant qui arrive de l'amont, avec une direction inclinée par rapport la berge droite. Nous avons assumé que seuls

les angles de vitesse dont l'ouverture est comprise entre $\pm 90^\circ$ et $\pm 180^\circ$ peuvent être considérés comme des indices d'un fonctionnement lentique, car ils procéderaient en sens contraire à la direction du lit du tributaire.

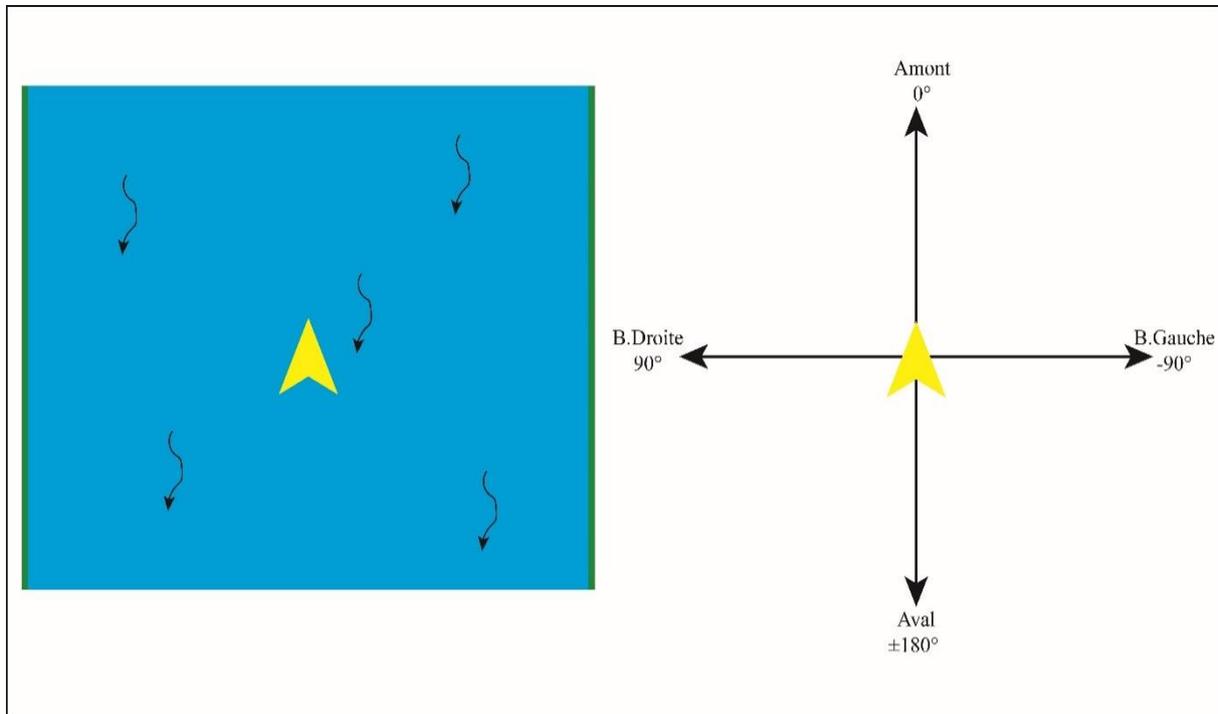


Figure 27 : Le système de vecteurs orientés utilisé pour matérialiser la direction des courants dans les retenues de seuil. À gauche : la réalité de terrain. À droite : la réalité de terrain transformée dans le système de vecteurs. La flèche jaune représente l'orientation du capteur du courantomètre (Réalisation : Francesco Donati).

Pour caractériser le niveau énergétique des courants observés dans les retenues de seuil, le nombre de Froude (Fr) a été calculé. Nommé ainsi en l'honneur de l'ingénieur anglais William Froude (1810 – 1879) qui en a montré les potentialités dans des problèmes d'ingénierie navale, ce paramètre est considéré comme l'indicateur universel de l'état des écoulements à surface libre (Henderson, 1966). Il exprime le rapport entre les forces d'inertie et la force de gravité qui contrôlent un courant et on le calcule selon la formule qui suit :

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gY}} \quad [1.4]$$

Où U (m/s) est la vitesse de l'écoulement, g (m/s) l'accélération de gravité et Y (m) est la profondeur de l'écoulement. Quand $Fr < 1$ l'écoulement est dominé par la force de gravité et il est appelé « subcritique », quand $Fr > 1$ l'écoulement est dominé par les forces d'inertie et il est appelé « supercritique » et quand $Fr = 1$ il n'y a pas une claire dominance d'une de ces deux forces et l'écoulement est appelé « de transition ». Dans les cours d'eau, le nombre de

Froude est pratiquement toujours inférieur à l'unité (Bettinetti et al., 2007; Grant, 1997; Mount, 1995), mais il présente des valeurs différentes d'un faciès d'écoulement à un autre. C'est pour cette raison que les hydrobiologistes et les hydromorphologues l'utilisent habituellement pour différencier les habitats fluviatils (*e.g.* Entwistle et al., 2019 ; Geguzis et al., 2014 ; Jowett, 1993 ; Kemp et al., 2000). À titre d'exemple, selon Allen (1951), les seuils naturels et les mouilles qui s'enchainent dans les cours d'eau présentent des valeurs de Fr respectivement $> 0,25$ et $< 0,15$. En faisant référence à ces chiffres, nous assumons que les conditions hydrodynamiques qu'on retrouve dans les mouilles sont celles qui se rapprochent le plus d'un plan d'eau. Donc, si dans les retenues de seuil on retrouve ces valeurs, alors cela sera considéré comme un indice de « lenticité » ; dans le cas contraire cela sera considéré comme un indice de « loticité ». En effet, comme nous l'avons déjà vu au cours de la première partie de ce travail de recherche, ces milieux fluviatils eux aussi, sont caractérisés par des courants à très faible énergie, qui déterminent la sédimentation des particules et la formation de stratifications thermiques, exactement comme dans les milieux lenticques.

Pour déterminer le temps de séjours des eaux (T) dans une retenue de seuil, la formule suivante a été utilisée (Pilotti et al., 2014) :

$$T = \frac{V}{Q} \quad [1.4]$$

Où V est le volume d'eau (m^3) contenu dans la retenue de seuil et Q est le débit (m^3/h) qui l'alimente. Pour déterminer V , il a été nécessaire de réaliser une étude bathymétrique de chaque terrain d'étude, à l'aide de la sonde « CTD CastAway ». Cet instrument est spécialement conçu pour la mesure de la température, de la conductivité/salinité, de la vitesse du son et de la profondeur de l'eau dans les plans d'eau, ponctuellement ou le long d'une verticale (il est également doté d'un GPS) . Dans chaque retenue de seuil, l'échantillonnage de la profondeur a été réalisé de façon à obtenir une grille de points qui montre le plus fidèlement possible l'évolution de ce paramètre. À partir de ces données, la profondeur moyenne a été calculée et elle a été multipliée par la surface de la retenue (estimée à travers des méthodes géomatiques), obtenant ainsi le volume. Straškraba et al. (1993) affirment que les retenues dont le temps de séjour des eaux est inférieur à dix jours présentent des traits lotiques très marqués et seules celles qui dépassent ce seuil commencent à montrer de véritables caractéristiques lenticques. En faisant référence à ces valeurs, nous considérerons T comme indice de fonctionnement lenticque uniquement quand il est supérieur à 10 jours.

1.3 Les techniques utilisées pour étudier le fonctionnement sédimentaire d'une retenue de seuil

Pour étudier la compétence sédimentaire des flux d'eau qui se développent à l'intérieur d'une retenue de seuil et la conformation de ses fonds, il est nécessaire d'analyser l'énergie des courants, mesurer l'épaisseur d'une éventuelle couche de sédiments, ainsi que leur granulométrie. Pour ce qui concerne le premier aspect, les données relatives à la vitesse des flux d'eau collectées au cours de l'étude hydrodynamique ont été réutilisées. Pour ce qui concerne le deuxième et le troisième aspect, en revanche, il a été nécessaire de collecter respectivement des nouvelles données bathymétriques et des échantillons de sédiments du fond des retenues, grâce à des techniques couramment utilisées en Limnologie.

1.3.1 Les techniques utilisées pour étudier l'épaisseur de la strate de sédiments et prélever des échantillons de sédiments du fond des retenues de seuil

Pour savoir si une couche de sédiments recouvre le fond d'une retenue de seuil et connaître son épaisseur, nous avons utilisé une technique qui a déjà été largement déployée dans d'autres types de retenues (Carlini, 2006 ; Maleval & Jigorel, 2002 ; Maleval & Pitois, 2017) et qui se base sur la mesure de la profondeur de l'eau (P_{lit}) et du substrat (P_{sub}) à l'aide d'une barre graduée, le long de plusieurs transects. Partant d'une berge, P_{lit} a été mesurée en plusieurs points espacés d'un mètre, en veillant à ce que la barre graduée reste en position verticale grâce à un niveau à boule (fig. 28). Ensuite, dans les mêmes points, après cette première mesure, une pression a été appliquée à la perche pour l'enfoncer dans le substrat et connaître ainsi sa profondeur (P_{sub}). Nous avons opté pour cette méthode à cause de sa simplicité d'application et qui semble particulièrement adaptée dans les retenues de seuil, où les profondeurs ne sont jamais trop importantes, rendant obsolètes des techniques comme la bathymétrie par échosondeur, etc.



Figure 28 : Les opérations de mesure de la profondeur du substrat dans l'une des retenues de seuil en étude (Photo de Francesco Donati).

Les échantillons de sédiments ont été prélevés du fond des retenues de seuil grâce à l'utilisation d'un carottier. Parmi les innombrables méthodes existantes en Limnologie pour collecter des particules dans un plan d'eau, l'emploi de cet instrument a été privilégié car il permet non seulement l'extraction des sédiments, mais aussi l'analyse de leur disposition verticale. Ainsi, il a été possible d'observer si la partie sommitale des fonds des retenues de seuil est composée par une strate de vases organiques, comme c'est le cas dans les étangs. Le carottier qui a été déployé est de type « Beeker » (fig. 29), expressément conçu pour un usage dans des milieux saturés. Son aspect et son fonctionnement sont similaires à celui d'une grosse seringue, puisqu'il est composé d'un piston métallique inséré dans un tuyau transparent en PVC : par le biais d'une poignée, on applique une pression verticale et au fur et à mesure que le carottier s'enfonce dans le substrat un vide se forme, permettant d'emmagasiner les particules dans le tuyau en plastique.



Figure 29 : Le carottier Beaker vide (à gauche) et remplis de sédiments (à droite) (Source : Sedec France).

1.3.2 Le traitement des données sédimentaire

Pour quantifier la compétence des courants dans les retenues de seuil, les vitesses mesurées pendant l'étude hydrodynamique ont été rentrées dans le diagramme de Hjulström (1935), qui, comme on l'a vu dans la première partie de cette recherche, montre l'attitude des particules en fonction de l'énergie de l'eau. Ainsi, il a été possible de déterminer le comportement des différents types de sédiments et de savoir si les courants qui caractérisent ces milieux sont capables de les éroder/transporter ou si leur force est si faible qu'elle engendre la sédimentation. Au cours de ce type d'analyse, notre attention s'est concentrée sur quatre classes granulométriques : celle des graviers, celle des sables, celles des limons et celle des argiles. Les sédiments plus gros n'ont pas été pris en compte, car ils ne sont pas présents dans les sites que nous avons étudiés.

Pour savoir si une couche de sédiments se forme dans les retenues de seuil, P_{lit} et P_{sub} mesurés dans chaque transect ont été rentrés dans un tableur Excel. Ensuite, la différence entre ces deux valeurs a été exécutée : le résultat de cette opération donne l'épaisseur de la strate de matériaux existants sur le fond. Pour chaque transect la moyenne de cette valeur a été calculée et un graphique qui montre l'évolution de ce paramètre a été dessiné, afin de déterminer s'il existe des zones où le phénomène de sédimentation est plus fort.

Pour connaître la nature des sédiments qui composent les fonds des retenues de seuil, une étude approfondie des carottes prélevées a été exécutée. Après leur extraction, elles ont été positionnées dans un bac expressément conçu pour conserver leur forme et elles ont été laissées sécher. Entretemps, chaque carotte a été photographiée, mesurée et examinée, afin de connaître la nature des différents horizons et spécialement pour comprendre si leur partie sommitale est composée de vases organiques, qui normalement apparaissent plus foncées que les sédiments minéraux. Ensuite, les sédiments qui composent chaque carotte ont été positionnés dans un bac en plastique et homogénéisés en les mélangeant pendant trois minutes. Après cette opération, un échantillon de 100 grammes a été prélevé pour le préparer au tamisage qui permet de déterminer la granulométrie des particules. Cette préparation consiste à enlever la matière organique qui, au cours du tamisage, peut former des « grumes » qui altèrent l'exactitude de l'analyse granulométrique. Pour effectuer cette opération nous avons suivi le protocole d'analyse des sédiments lacustres mis en place par Boggero et al. (2011):

- De l'eau oxygénée (12%) a été versée sur les sédiments dans un rapport 2:1 (qui dans notre cas correspond à 200 gr de liquide) et elle a été laissée libre de « digérer » la matière organique pendant trois jours.
- Une fois cette période écoulée, on ajoute une quantité d'eau déminéralisée représentant le double du volume occupé par les sédiments afin de dissoudre les éventuelles particules de sel qui se sont formées pendant la phase précédente. Dans ce cas aussi, l'eau déminéralisée a été laissée libre d'agir pendant trois jours.
- Cette période écoulée, le liquide a été évacué à l'aide d'une seringue, en veillant à ne pas remettre en suspension les particules plus fines. Les sédiments traités avec cette technique ont été ensuite séchés.

Une fois que la matière organique a été éliminée, chaque échantillon a été tamisé pendant cinq minutes grâce à la tamiseuse « LED SC250 », dans une colonne de cinq tamis (fig. 30). Respectivement, ils ont une lumière de 2 mm, 0,25 mm, 0,063, 0,032 mm et 0,025 mm et ils permettent de distinguer respectivement les graviers, les sables moyens, les sables fins, les limons grossiers et les limons moyens (selon l'échelle granulométrique de Wentworth). Toutes les particules qui ont traversé le tamis avec les mailles les plus petites ont été considérées comme « particules fines » (limons fins et argiles). Ensuite, pesant la fraction retenue par chaque tamis grâce à une balance de précision, la courbe granulométrique de chaque échantillon a été



Figure 30 : La colonne de tamis utilisée pour les analyses granulométriques (Photo réalisée par Francesco Donati, 2019).

établie.

L'ensemble de ces procédés a été appliqué dans trois terrains d'étude différents, afin de pouvoir collecter nécessaires pour répondre à la problématique. Il s'agit de trois retenues de seuil situées en France métropolitaine.

2. LES RETENUES DE SEUIL ÉTUDIÉES AU COURS DE LA RECHERCHE

Cette méthodologie permettant de comprendre les fonctionnements le fonctionnement hydrodynamique, sédimentaire et thermique des retenues de seuil a été déployée dans plusieurs terrains d'étude. Ils ont été sélectionnés sur la base de deux critères :

- Les critères infrastructureux.
- Les critères environnementaux.

Les critères infrastructureux sont ceux auxquels nous avons accordé la plus grande importance. En effet, comme Csiki & Rhoads (2010) et Fencl et al. (2015) l'affirment, la magnitude des effets qu'un seuil en rivière engendre à son amont dépendent en grande partie de sa hauteur. Ainsi, nous avons voulu étudier l'effet de différents types de seuils en rivière, faisant attention à sélectionner des ouvrages représentatifs du contexte de la France métropolitaine, la problématique de cette recherche étant issue de ce territoire. Pour cette raison, nous avons accompli une étude à partir du Référentiel des Obstacles à l'Écoulement, la base de données construite par l'ONEMA en 2010 qui recense ce type d'ouvrages hydrauliques dans le territoire français. Cet examen a mis en évidence que les seuils en rivière qui existent en France sont globalement de faibles dimensions, allant rarement au-delà de deux mètres d'hauteur. Plus précisément, 36 % ont une hauteur comprise entre 0 et 1 mètre, 24 % ont une hauteur comprise entre 1 et 2 mètres et 13 % ont une hauteur égale et supérieure à 3 mètres (pour le 27 % des ouvrages restants ce paramètre est inconnu). Sur la base de ces résultats, nous avons décidé d'étudier une retenue de seuil formée par un petit ouvrage dont la hauteur s'atteste autour de 0,5 m, une retenue de seuil formée par un ouvrage de taille moyenne dont la hauteur s'atteste autour de 1 m et une retenue de seuil formée par un grand ouvrage dont la hauteur s'atteste autour de 2 m.

Les critères environnementaux que nous avons pris en compte ne se réfèrent pas au contexte hydro-climatique des terrains d'étude, étant donné qu'il est quasiment impossible de trouver des sites représentatifs de la multitude de climats, lithologies, etc. qui existent en France, mais plutôt à certaines caractéristiques qui nous auraient permis d'analyser l'influence de certaines variables et de faire des comparaisons avec d'autres milieux aquatiques. La variable que nous souhaitions examiner était l'influence de la ripisylve sur le fonctionnement thermique des retenues de seuil. En effet, contrairement aux étangs dont la plus grande surface rend moins efficace l'ombrage de la végétation, dans les retenues de seuil qui présentent des étendues

beaucoup plus faibles, son rôle sur la température de l'eau devrait être plus important. Pour ce qui concerne les comparaisons avec d'autres environnements aquatiques, l'objectif de cette thèse étant de comprendre si les retenues de seuil fonctionnent comme des plans d'eau, nous avons estimé crucial de comparer directement les caractéristiques d'un de ces milieux avec celui d'un étang situé dans le même contexte environnemental. Ainsi, sur la base de ces deux critères, trois retenues de seuil ont été sélectionnées pour y collecter les données nécessaires à répondre à la problématique de cette recherche : celle de Saint-Hilaire, celle Baerenthal et celle de Thévalles.

2.1 La retenue de seuil de Saint-Hilaire

La retenue de seuil de Saint-Hilaire se trouve dans le village Loirétain de Meung sur Loire, situé à l'Ouest de la ville d'Orléans, dans la région Centre Val de Loire. Elle est représentative des retenues de seuil formées par un ouvrage de petite taille, le seuil en rivière qui la forme mesurant 0,5 m d'hauteur (fig. 31).



Figure 31 : Le seuil en rivière qui forme la retenue de seuil de Saint-Hilaire à Meung sur Loire (Source : Comm.de Comm. Terres du Val de Loire).

2.1.1 Les caractéristiques du seuil en rivière de Saint-Hilaire

Par le passé, cet ouvrage hydraulique était utilisé pour actionner le moulin à farine de Saint-Hilaire, qui a cessé toute activité en 1779 et qui donne le nom à ce terrain d'étude. Comme pour d'autres moulins existant sur ce territoire, le seuil en rivière est abrité à l'intérieur de l'ancienne usine (voir figure 31 et 32) et il est équipé d'une vanne ouvrière inclinée de 30° vers le bas, que le meunier manœuvrait pour augmenter ou diminuer la vitesse de la roue hydraulique : plus la vanne était baissée, plus grande était la pression de l'eau sur la turbine, qui en conséquence tournait plus rapidement. En raison de l'usure du temps, aujourd'hui cette vanne n'est plus utilisable et elle repose sur le seuil, augmentant de ce fait sa hauteur car les eaux ne passent plus directement sur l'ouvrage transversal mais sur l'élément mobile qui le surmonte (fig. 32). Les autres annexes hydrauliques du moulin sont dans le même état de délabrement et plus précisément les vannes de décharge qui servaient pour vidanger le bief quand il était nécessaire de l'entretenir. L'une d'entre elles a été démolie, afin d'empêcher les intrusions dans le bâtiment en ruine et à sa place a été construit une sorte de petit seuil en rivière sur lequel les eaux s'écoulent librement. La conformation de l'ancien moulin de Saint-Hilaire et la position de ses annexes hydrauliques sont schématisés dans la figure 33.

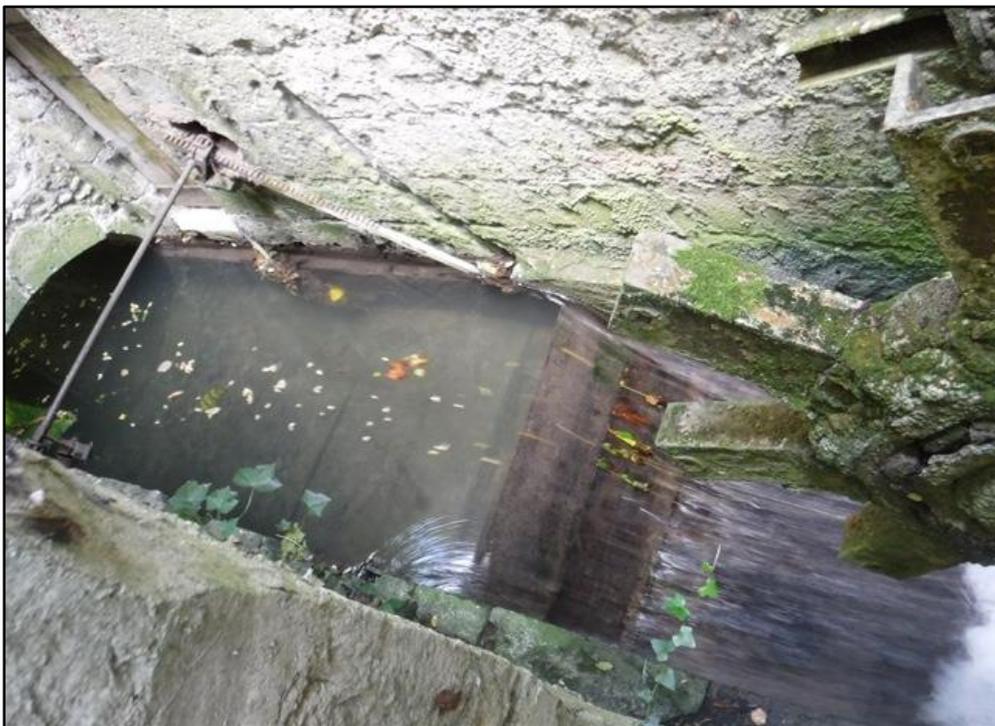


Figure 32 : L'ancienne vanne ouvrière du moulin de Saint-Hilaire, aujourd'hui bloquée sur le seuil en rivière principale. Dans la photo on voit également les anciens mécanismes qui permettaient de la manœuvre et l'emplacement de la turbine (Source : Comm.de Comm. Terres du Val de Loire)

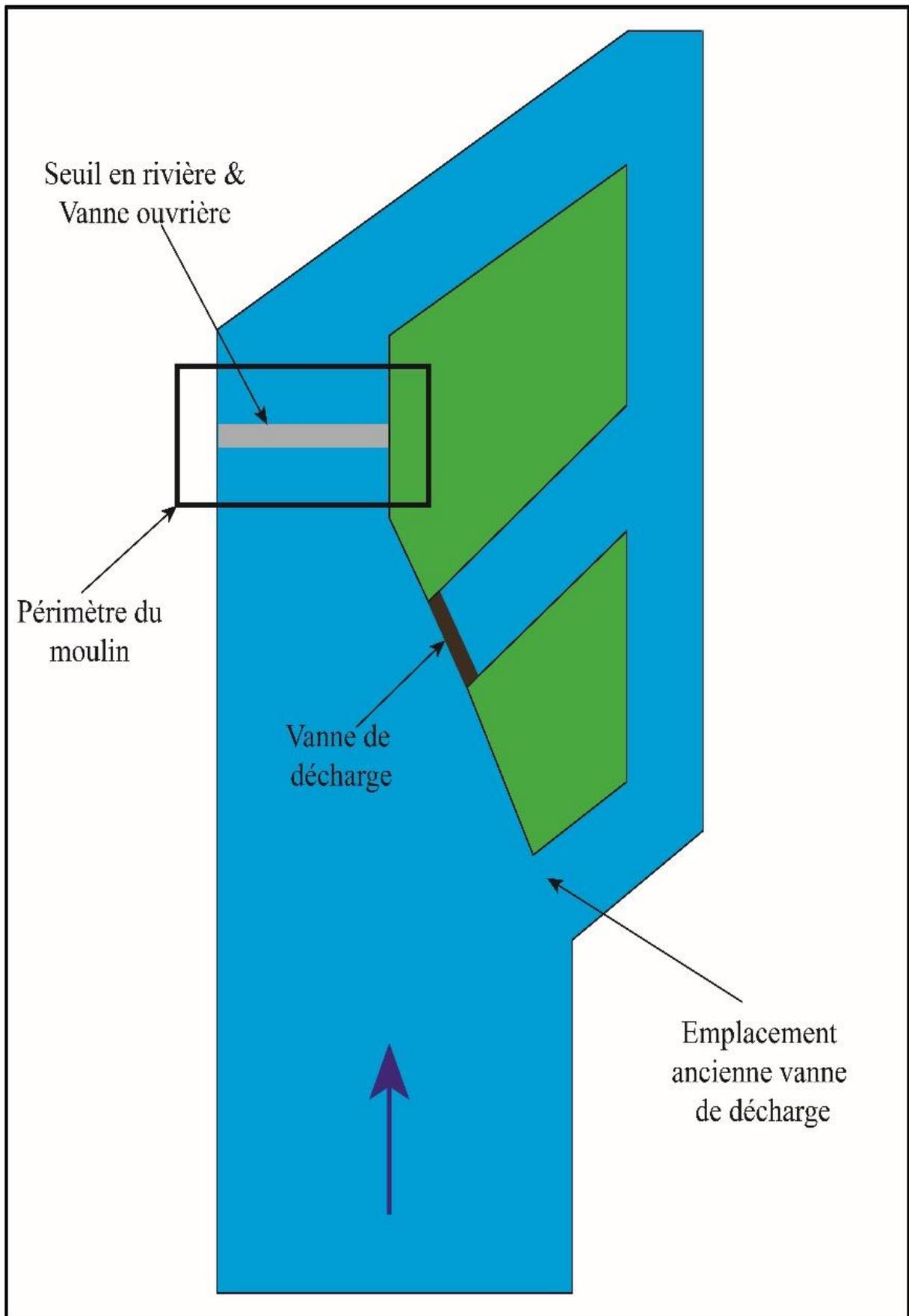


Figure 33 : Schéma résumant la disposition des annexes hydrauliques du moulin de Saint-Hilaire (Réalisation : Francesco Donati).

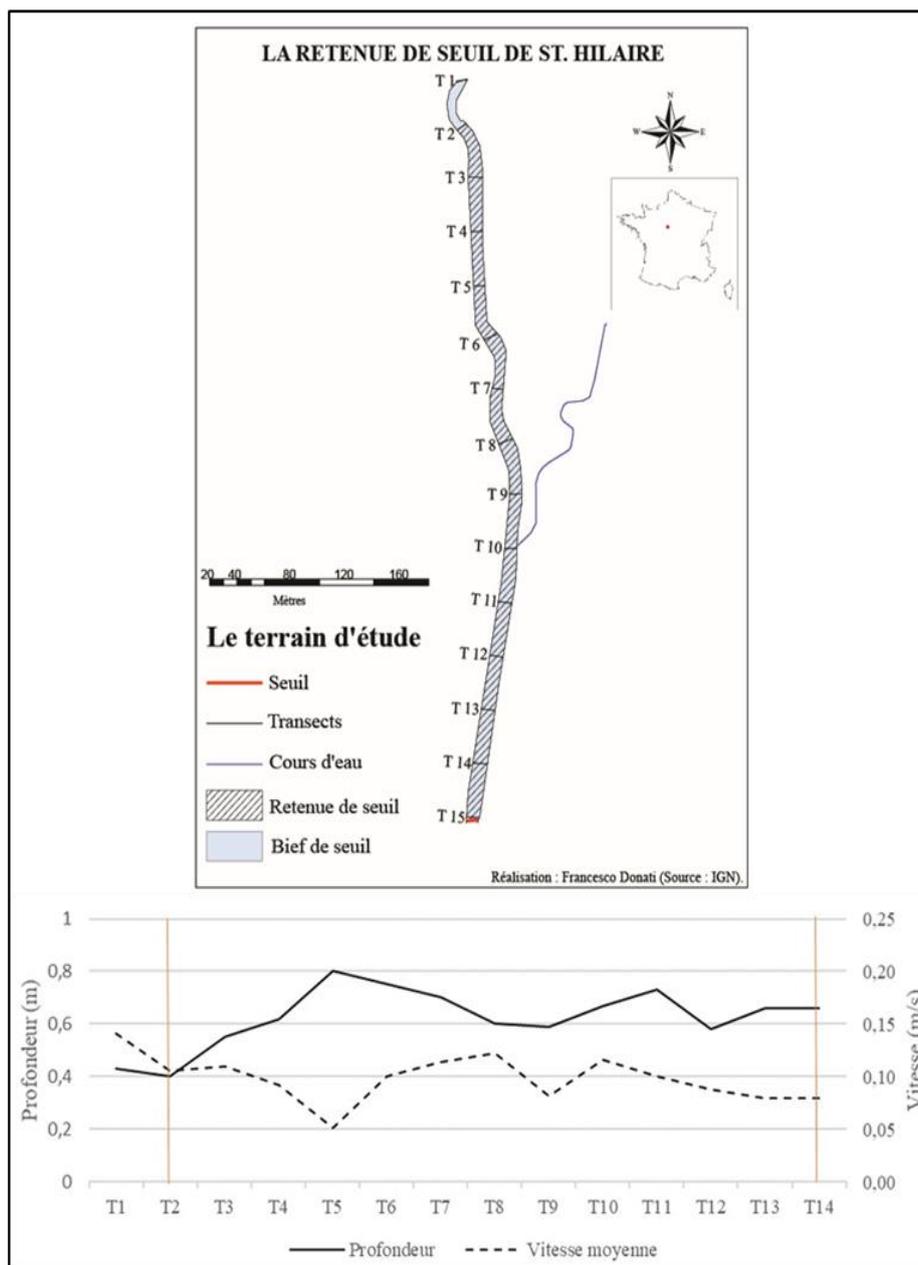


Figure 34 : L'étendue spatiale de la retenue de seuil de Saint-Hilaire. Les traits rouges matérialisent les limites de la retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati ; source : IGN).

2.1.2 Les caractéristiques de la retenue de seuil de Saint-Hilaire

À l'amont de ce seuil en rivière se développe un bief long d'environ 500 m, orienté Nord-Sud. Dans la presque totalité de cet espace s'étale la retenue de seuil générée par l'ancien moulin (Transects 2-15), qui présente une surface d'environ 0,5 ha, une largeur moyenne de 8 m et une profondeur moyenne de 0,54 m (Prof. max : 1 m ; Prof. min. : 0,2 m). Sa délimitation a été rendue facile par le fait qu'elle confine à l'amont avec le seuil en rivière d'un autre moulin, celui de Pantin. En effet, par le passé, un règlement obligeait le meunier du moulin de Saint-

Hilaire à régler le niveau d'eau de son bief à une hauteur préfixée, pour ne pas gêner l'activité de son voisin d'amont. Encore aujourd'hui l'organisme qui s'occupe de la gestion du site (la Communauté de Communes Terres du Val de Loire) adapte la profondeur de la rivière de cette manière, grâce à l'ancienne pierre de niveau qui servait pour matérialiser la hauteur d'eau réglementaire. Pour cette raison, les effets du seuil de Saint-Hilaire s'étalent sur l'ensemble du bief qui sépare les deux moulins, un fait que la méthodologie que nous avons élaborée pour délimiter le périmètre des retenues de seuil a confirmé (fig. 34). Tout autour de ce site pousse une ripisylve dense, qui ombrage les eaux à toute heure de la journée. Dans la retenue de seuil se jettent les eaux d'un petit chenal, qui prend sa source de la vanne de décharge d'un moulin situé plus en amont et qui en dehors des périodes de hautes eaux, est caractérisé par des débits extrêmement faibles. Ainsi, la plupart de l'eau qui alimente la retenue de seuil de Saint-Hilaire provient directement du moulin de Pantin.

Le seuil en rivière du moulin de Saint-Hilaire et la retenue de seuil qu'il forme se situent le long des Mauves, affluent de rive droite de la Loire long de 40 km, qui coule dans un bassin versant qui s'étale dans la Beauce, caractérisé par une occupation du sol principalement agricole (fig. 35). Ce territoire se distingue par un relief peu prononcé, qui ne dépasse pas les 200 mètres au-dessous du niveau de la mer (fig. 36), et par un sous-sol constitué surtout par des calcaires d'origine lacustre (fig. 37). Le nom au pluriel de ce cours d'eau dérive du fait qu'il se compose de plusieurs bras qui prennent leur source à partir de résurgences de la nappe de Beauce : la Mauve de Montpipeau, la Mauve de Fontaine, la Mauve de Detourbe et la Dourdaigne²¹. Le terrain d'étude se situe sur la Mauve de Detourbe, qui constitue le drain principal de cette rivière. Le contexte climatique de ce terrain d'étude est de type océanique dégradé, avec des hivers doux et des étés chauds (Escourrou, 1982). Selon la station météorologique de Bricy, située sur la limite orientale du bassin versant des Mauves, durant la période 1981-2016 la température moyenne a été de 11,2 °C (la température maximale moyenne a été de 15,8 °C et la minimale de 6,7 °C) et le cumul moyen des précipitations a été de 642,5 mm. D'un point de vue hydrologique, le régime des Mauves est de type pluvial, avec les hautes eaux pendant les saisons les plus arrosées et les basses eaux pendant celles les plus sèches ; le débit moyen

²¹ La confluence entre ces quatre cours d'eau ne serait pas naturelle. Une légende locale raconte qu'elle aurait été créée autour du 500 A. J. C. par les moines adeptes de Saint Liphard, qui s'étaient installés à Meung sur Loire. En voulant assécher les différentes zones humides qui se développaient autour des résurgences de la nappe de Beauce, ils auraient fait confluer les eaux dans le lit de la Mauve de Detourbe. Encore aujourd'hui le tracé des Mauves est caractérisé par un grand nombre de petits chenaux qui se jettent dans le tronçon principal.

calculé par la station limnimétrique située sur ce cours d'eau (entre 2006 et 2020) est d'environ 1 m³/s.



Figure 35 : Le bassin versant des Mauves et l'emplacement du seuil en rivière de Saint-Hilaire (Réalisation : Francesco Donati).

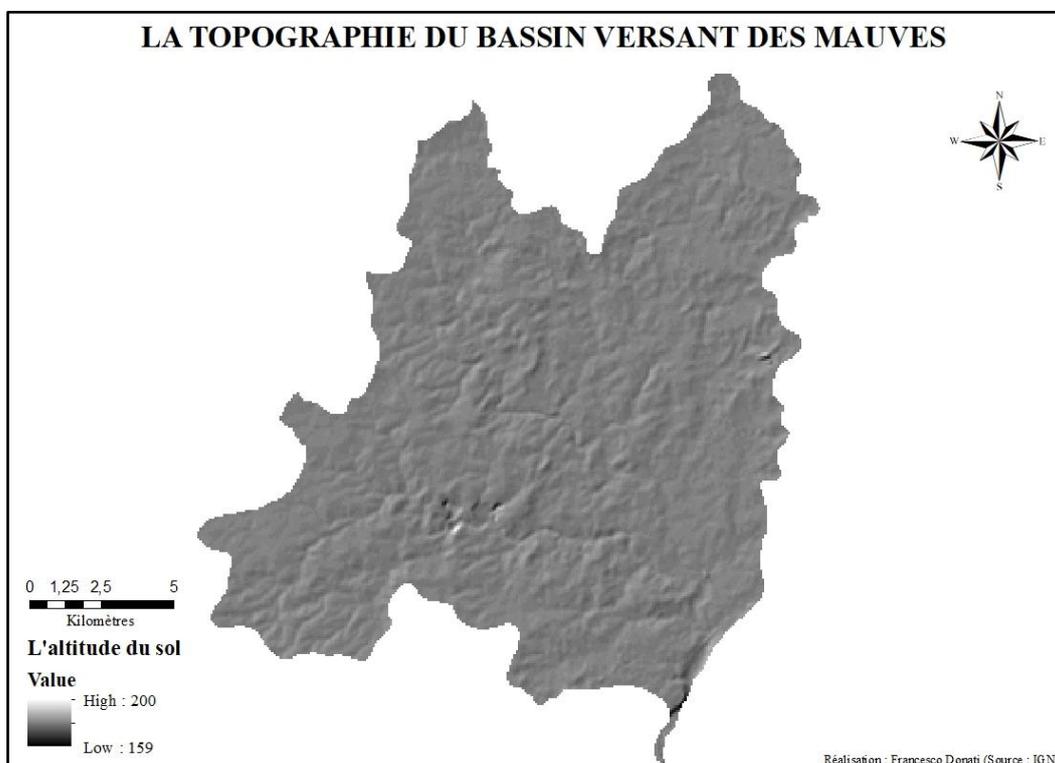


Figure 36 : La topographie du bassin versant des Mauves (Réalisation : Francesco Donati).

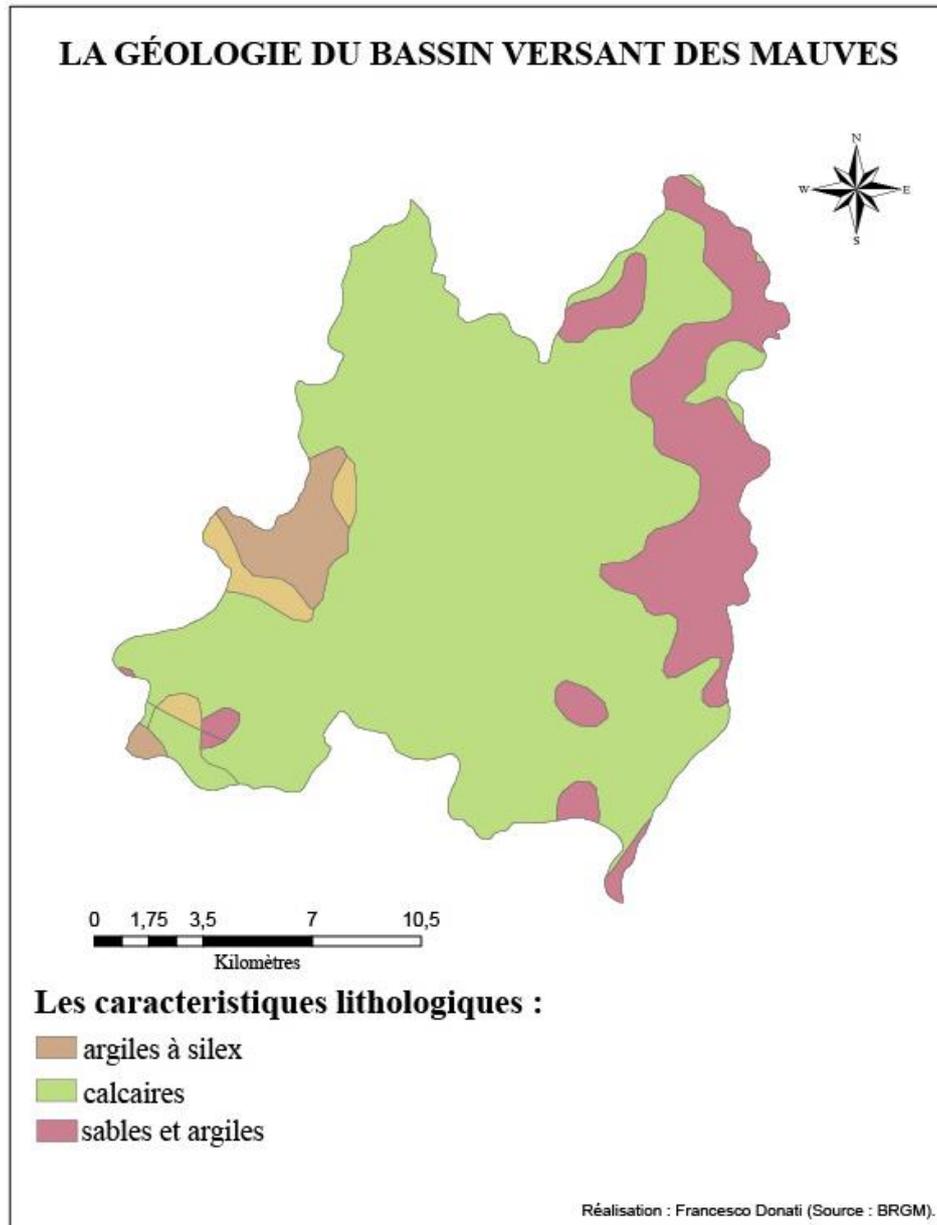


Figure 37 : La géologie du bassin versant des Mauves (Réalisation : Francesco Donati).

Au cours des siècles, les Mauves ont été transformées en une véritable « usine à ciel ouvert », grâce à la construction de 37 moulins à eaux : certains d’entre eux auraient plus de mille ans et le dernier a cessé son activité en 2010. Si l’hydrologie de ce territoire est assez favorable à l’installation de ce type d’ouvrage hydraulique en raison de l’alimentation en eau de la rivière par la nappe de Beauce, ce n’est pas le cas pour ce qui concerne la topographie, car elle ne permet pas aux eaux d’avoir naturellement assez d’énergie pour faire tourner la roue hydraulique, en raison des faibles dénivelés qui la caractérisent. Pour résoudre ce problème, les hommes ont lourdement modifié le tracé du cours d’eau, déviant à plusieurs endroits les Mauves contre les bords de sa vallée et les faisant retomber dans le lit naturel au niveau des moulins.

Dans certains secteurs, les aménagements ont été tellement lourds que l'emplacement du chenal originel du cours d'eau a été perdu.

2.1.3 L'application de la méthodologie dans la retenue de seuil de Saint-Hilaire

La méthodologie que nous avons élaborée a été appliquée sur ce terrain d'étude sans grandes variations. L'étude du fonctionnement thermique a été exécutée en positionnant deux chaînes de thermomètres dans des endroits où le courant est particulièrement lent, afin de pouvoir étudier ce paramètre dans des conditions les plus lentes possibles. La première a été positionnée au niveau du transect 13 en février 2018 et la deuxième au niveau du transect 5 en février 2019 : dans les deux cas, deux thermomètres ont été fixés au dispositif, à 0,10 et 0,50 m de profondeur.

Du point de vue sédimentaire, grâce à un court séjour d'échange scientifique effectué à l'Université de Tallinn en Estonie, une analyse plus approfondie du taux de matière organique présente dans cette retenue de seuil a été réalisée, au moyen de la méthode de la « perte au feu » (fig. 38). Elle a été appliquée sur des échantillons provenant de T1, T4, T8 et T13, en utilisant une technique similaire à celle décrite par Håkanson & Jansson (1983). Une petite fraction d'environ 10 grammes de sédiments a été prélevée de chaque échantillon et positionnée dans des petits pots en céramiques. Ils ont été déposés dans un four à calcination, qui pèse les sédiments avant et après chaque cycle d'analyse. Ils ont été chauffés à 550 °C pendant 8 heures. Une fois que ce temps écoulé, le four envoie les résultats de la perte au feu à un ordinateur, où il est possible de les visualiser et de les télécharger à partir d'un fichier Excel.



Figure 38 : La perte au feu des sédiments de la retenue de seuil de Saint-Hilaire à l'Université de Tallinn en Estonie (Photo réalisée par Francesco Donati).

2.2 La retenue de seuil de Baerenthal

La retenue de seuil de Baerenthal se trouve dans le village mosellan homonyme, situé dans le périmètre du Parc Naturel Régional des Vosges du Nord, au Sud-Est de la ville de Bitche, dans la région Grand Est. Elle est représentative des retenues de seuil formées par un ouvrage de taille moyenne, le seuil en rivière²² qui la forme mesurant 1 m de hauteur.

2.2.1 *Les caractéristiques du seuil en rivière de Baerenthal*

Cet ouvrage hydraulique se présente comme le classique seuil en rivière en béton, dépourvu de tout élément mobile. Immédiatement à son aval, il y a deux seuils plus petits, dont la hauteur devrait culminer autour de 30 cm²³ : les trois ouvrages forment une sorte d'escalier et cette conformation sert probablement à "freiner" l'énergie des eaux après qu'elles sont tombées de la première chute et limiter ainsi l'érosion. Ce complexe de seuils en rivière est utilisé pour alimenter un canal de dérivation qui part de l'aval de la retenue de seuil, traverse des terrains agricoles et se jette après environ 400 mètres dans ce même cours d'eau qui lui donne naissance. Son point de départ était doté d'une vanne qui, probablement, servait pour régler le débit, comme on peut le déduire des restes de la structure qui la soutenait. La disposition de ces ouvrages hydrauliques sont schématisés dans la figure 39. L'histoire de ce seuil en rivière n'est pas claire, car nous n'avons réussi à collecter que très peu d'informations à ce sujet, tout au long des trois années de thèse. Son âge exact reste inconnu : il est clairement visible sur des photos aériennes prises en 1946, le chenal qu'elle alimente est dessiné sur la carte d'État-Major (XIX^{ème} siècle), mais aucun des deux ouvrages hydrauliques n'est présent sur celle de Cassini (XVIII^{ème} siècle).

²² Nous regrettons de ne pouvoir joindre une photo du seuil en rivière le plus grand et deux plus petits qui poussent à ses pieds, mais ils se révèlent impossibles à prendre en photo. En effet, l'aval de la retenue de seuil est bordé par de nombreux terrains et habitations clôturés, dont la plupart sont des maisons de vacances, vides pour la plupart de l'année : malgré nos nombreuses tentatives, nous n'avons jamais réussi à accéder à ces espaces.

²³ Pour la même raison expliquée dans la note de bas de page précédente, nous n'avons pas pu réaliser une mesure exacte de ces deux ouvrages.

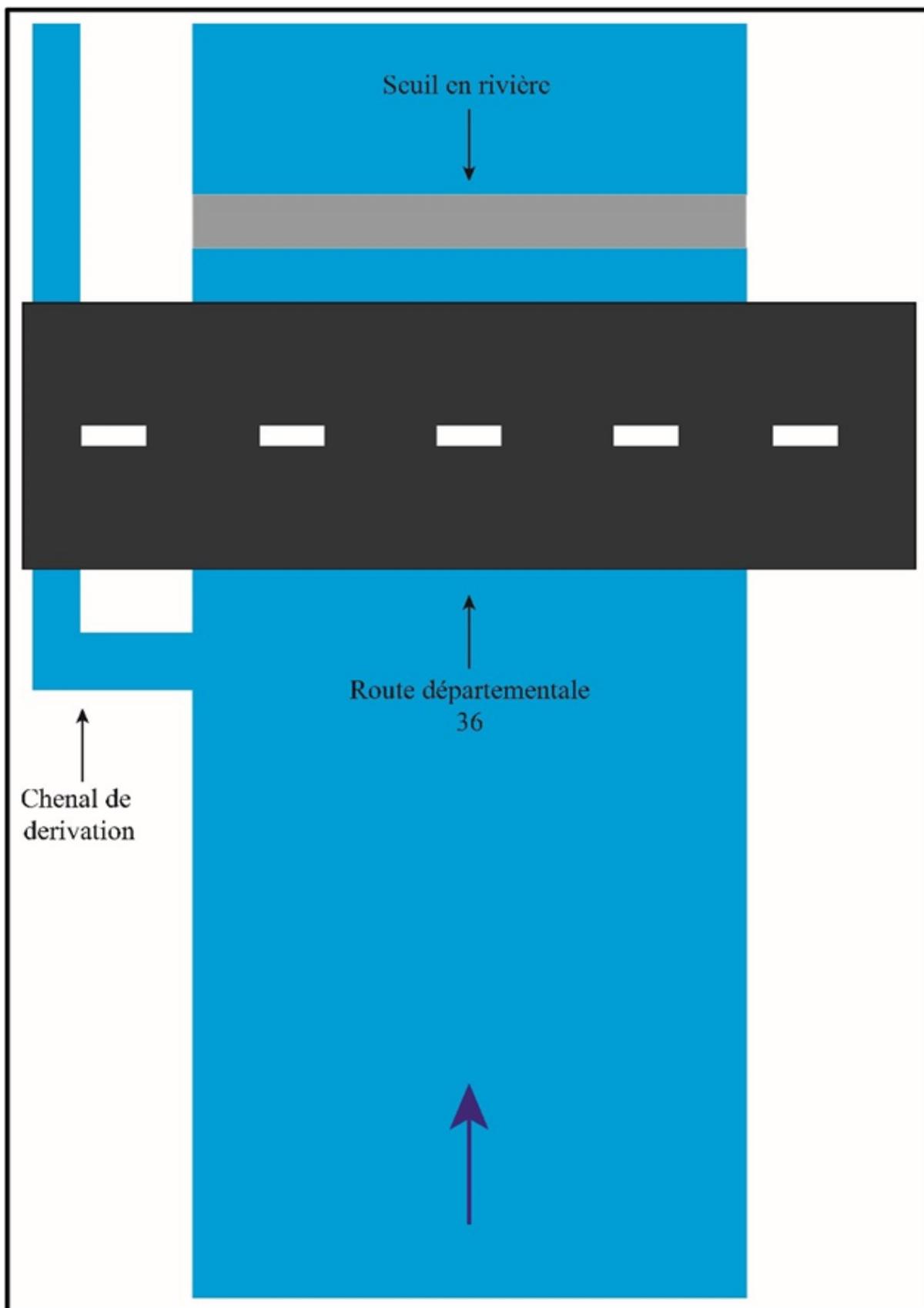


Figure 39 : Schéma résumant la disposition des annexes hydrauliques qui caractérisent la retenue de seuil de Baerenthal (Réalisation : Francesco Donati).

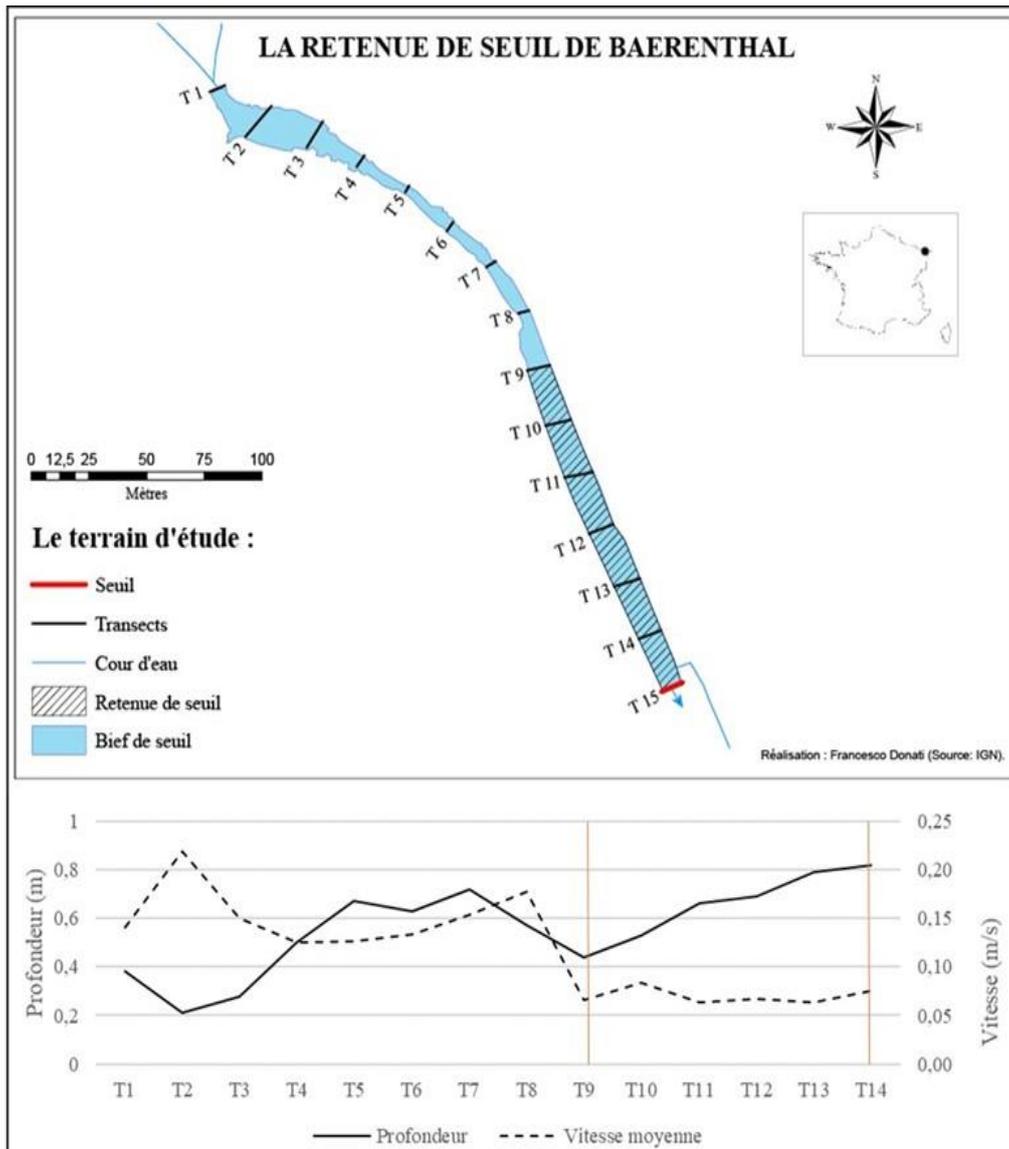


Figure 40 : L'étendue de la retenue de seuil de Baerenthal. Dans le graphique les traits rouges matérialisent les limites de la retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati ; source : IGN).

2.2.2 Les caractéristiques de la retenue de seuil de Baerenthal

À l'amont de ce seuil en rivière se développe un bief long de 350 m, dont l'orientation est Nord-Ouest/Sud-Est. Après l'avoir divisé en 15 transects équidistants dans lesquels vitesse et profondeur de l'eau ont été mesurées, on sait que cet ouvrage forme une retenue de seuil dont la surface est de 0,2 ha, la longueur de 170 m, la largeur moyenne de 11 m et sa profondeur moyenne de 0,78 m (Prof. max. = 1,03 m ; Prof. min. = 0,52 m) : sa limite aval se situe au niveau du seuil en rivière (transect 15) et celle amont à proximité du transect 9 (fig. 40). Tout au long de ses berges pousse une ripisylve assez dense qui ombrage les eaux de la retenue de seuil tout au long de la journée. Dans sa partie aval, elle est traversée par un pont routier, sur lequel passe la route départementale 38.

La retenue de seuil de Baerenthal est alimentée en eau par la confluence entre deux bras de la Zinsel du Nord, un affluent de la Moder qui coule sur 40 km dans un bassin versant qui s'étale sur le massif des Vosges du Nord, caractérisé par une occupation du sol principalement agricole (fig. 41). Ce territoire se distingue par un relief assez escarpé, qui atteint les 243 mètres au-dessous du niveau de la mer (fig. 42), et par un sous-sol constitué surtout par des grès (fig. 43). Ces deux bras ne sont rien d'autre que deux tronçons qui sortent de deux plans d'eau situés peu en amont du seuil en rivière : l'étang de Baerenthal et celui du Ramstein (voir fig. 41). Le contexte climatique de ce terrain d'étude est de type océanique dégradé exacerbé par l'altitude (Escourrou, 1982). Selon la station météorologique de Mouterhouse, située non loin du village de Baerenthal à l'intérieur du bassin versant de la Zinsel du Nord, pendant la période 1981-2010 la température moyenne a été de 9,5 °C (la température maximale moyenne a été de 15 °C et la minimale de 4 °C) et le cumul pluviométrique moyen a été de 989,8 mm.



Figure 41 : Le bassin versant de la Zinsel du Nord et l'emplacement de la retenue de seuil en étude (Réalisation : Francesco Donati).



Figure 42 : La topographie du bassin versant de la Zinsel du Nord (Réalisation : Francesco Donati).

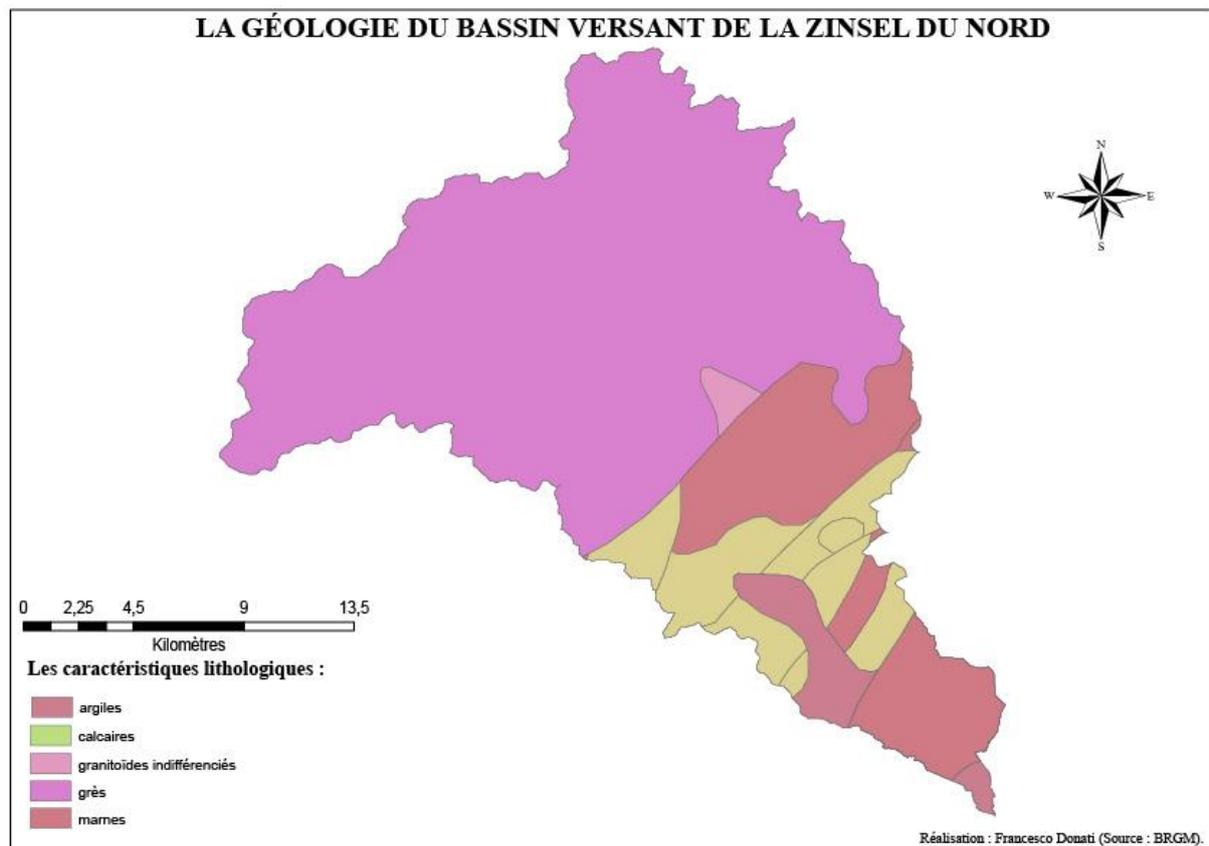


Figure 43 : La géologie du bassin versant de la Zinsel du Nord (Réalisation : Francesco Donati). 95

La zone située immédiatement à l'aval de la confluence qui alimente la retenue de seuil (Transects 1-5) a connu une histoire tourmentée. En 1945, une grosse bombe lâchée d'un avion tombe dans ce secteur, créant une mouille artificielle particulièrement profonde (fig. 44). Les habitants du village nous ont expliqué que cet espace qu'ils nomment encore aujourd'hui « le cratère » était devenu un spot de pêche très célèbre dans la région et que pour cette raison il a été entretenu jusqu'au milieu des années 1990, par le vidage des sédiments qui tendaient à le combler et qui ont réussi à le remplir maintenant que ce curage n'est plus effectué.



Figure 44 : Le cratère de la bombe qui a créé une sorte de mouille artificielle à l'amont de la retenue de seuil de Baerenthal dans une photo aérienne du 1946 (Source : IGN).

L'application de la méthodologie dans la retenue de seuil de Baerenthal

Cette retenue de seuil joue un rôle crucial dans notre recherche, en vertu de sa situation hydrologique très particulière. En effet, si à l'amont du seuil en rivière la Zinsel du nord est transformée en un plan d'eau, le fonctionnement abiotique de la retenue de seuil devrait être très similaire à celui des deux étangs situés peu à l'amont et donc dans le même contexte hydro-climatique. Ainsi, d'un point de vue thermique, la méthodologie décrite dans le chapitre précédant a été appliquée non seulement dans la retenue de seuil de Baerenthal, mais aussi dans

l'étang qui porte le même nom. Finalement, dans chacun de ces deux environnements (fig. 45) en total deux chaînes de thermomètres ont été déployées :

- Une dans la retenue de seuil, à l'endroit où a été observée la vitesse du courant la plus faible pendant les opérations de délimitation du terrain d'étude, afin d'étudier ce paramètre dans des conditions les plus lentes possibles ; dans cette zone, la profondeur de l'eau est d'environ 80 cm. À cette chaîne ont été fixés trois thermomètres, respectivement à une profondeur de 0,10, 0,40 et 0,70 m.
- Une dans la queue de l'étang, à proximité de l'embouchure de la Zinsel du Nord. Cette zone a été privilégiée car c'est celle qui présente les conditions hydrologiques les plus proches de celles de l'endroit où a été positionnée la chaîne de thermomètres dans la retenue de seuil. En effet, ici aussi la profondeur de l'eau est d'environ 80 cm et c'est dans ce secteur que théoriquement l'action du tributaire est la plus forte. À cette chaîne aussi ont été fixés trois thermomètres, respectivement à une profondeur de 0,10, 0,40 et 0,70 m²⁴.

D'un point de vue hydrologique et sédimentaire, la méthodologie que nous avons élaborée pour étudier ces deux compartiments a été appliquée sans aucune variation. Elle a été mise en place à l'intérieur du périmètre de la retenue de seuil (Transects 9-15), mais aussi en dehors (Transects 1-8), afin de pouvoir mieux déterminer d'éventuelles influences exercées par le seuil en rivière.

²⁴ En réalité, cette chaîne de thermomètres a été installée dans le cadre d'une étude financée par l'agence de l'eau Rhin-Meuse, auquel le laboratoire CEDETE participait. Elle a également servi à Quentin Choffel, dans le cadre de sa thèse de doctorat : « *La différenciation des masses d'eau à l'intérieur de l'étang : stratification verticale, zonation horizontale, bilan thermique et centre thermique* ».

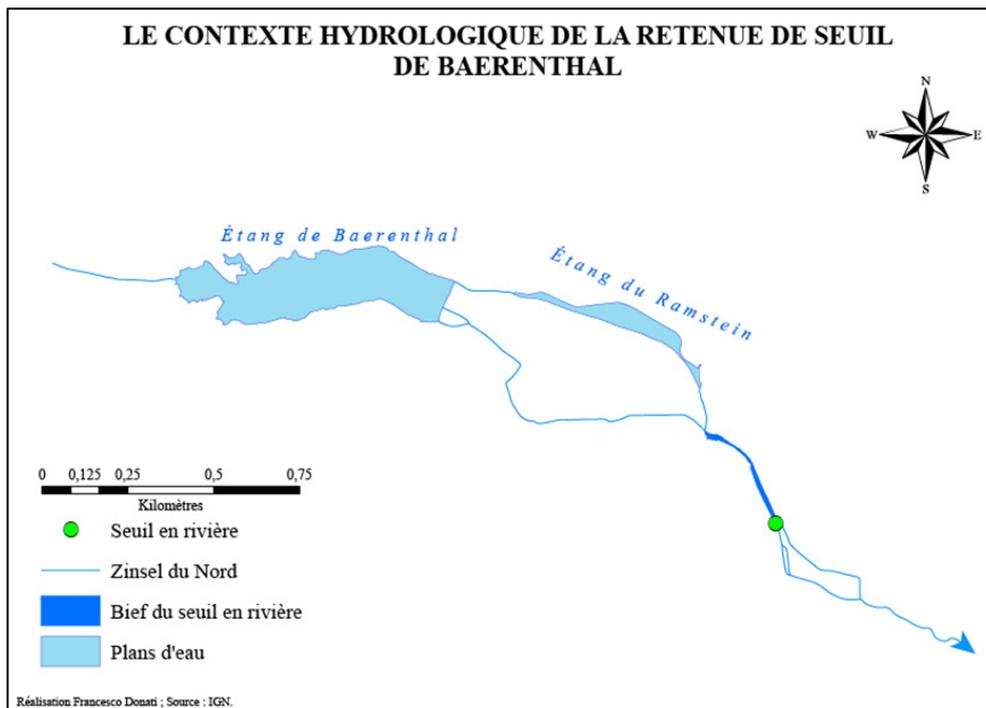


Figure 45 : Le contexte hydrologique de la retenue de seuil de Baerenthal (Réalisation : Francesco Donati).

2.3 La retenue de seuil de Thévalles

La retenue de seuil de Thévalles se trouve à proximité du village mayennais de Chéméré-le-Roi, situé au Sud-Est de la ville de Laval, dans la région des Pays de la Loire. Elle est représentative des retenues de seuil formées par un ouvrage de grande taille, le seuil en rivière qui la forme mesurant 2 m de hauteur (fig. 46).



Figure 46 : Le seuil en rivière du moulin de Thévalles (Photo réalisée par Francesco Donati, 2020).

2.3.1 Les caractéristiques du seuil en rivière de Thévalles

Cet ouvrage hydraulique servait pour le fonctionnement du moulin à farine de Thévalles, qui date du XIX^{ème} siècle et qui donne le nom à ce terrain d'étude. Le bâtiment actuel remplace une série d'anciens moulins, qui ont été détruits au fil du temps et dont le premier avait été construit autour du XIII^{ème} siècle : ils ont toujours été une annexe du château de Thévalles qui, encore aujourd'hui, surplombe sur une falaise cet ancien complexe industriel, lequel a même servi comme centrale électrique et station de pompage pour alimenter en électricité et en eau l'ancienne demeure (fig. 47).



Figure 47 : Le moulin de Thévalles (à gauche) et le château homonyme qui le surplombe (Photo réalisée par Francesco Donati, 2020).

Le seuil en rivière permet de dériver les eaux dans un très court chenal de dérivation, qui amène les eaux au moulin et qui est équipé d'un système de vannes de décharge, utilisées pour vidanger et entretenir le bief en amont. La conformation de l'ancien moulin de Thévalles et la position de ses annexes hydrauliques sont schématisées dans la figure 48. À proximité de

celles-ci, il existe une vanne ouvrière qui, comme celle du moulin de Saint-Hilaire, sert pour régler la vitesse de la turbine. Tous ces ouvrages et les mécanismes internes au moulin sont encore aujourd'hui fonctionnels et ils sont actionnés pendant les visites guidées à l'usine ou pour moudre, de temps en temps, des céréales et en faire de la farine. Au cours des différentes reconstructions qui se sont succédé au cours des siècles, le seuil en rivière du moulin a toujours été calibré sur la même hauteur que l'ouvrage précédent : ainsi, on peut supposer que le niveau d'eau à l'amont de ce moulin est le même depuis environ huit siècles.

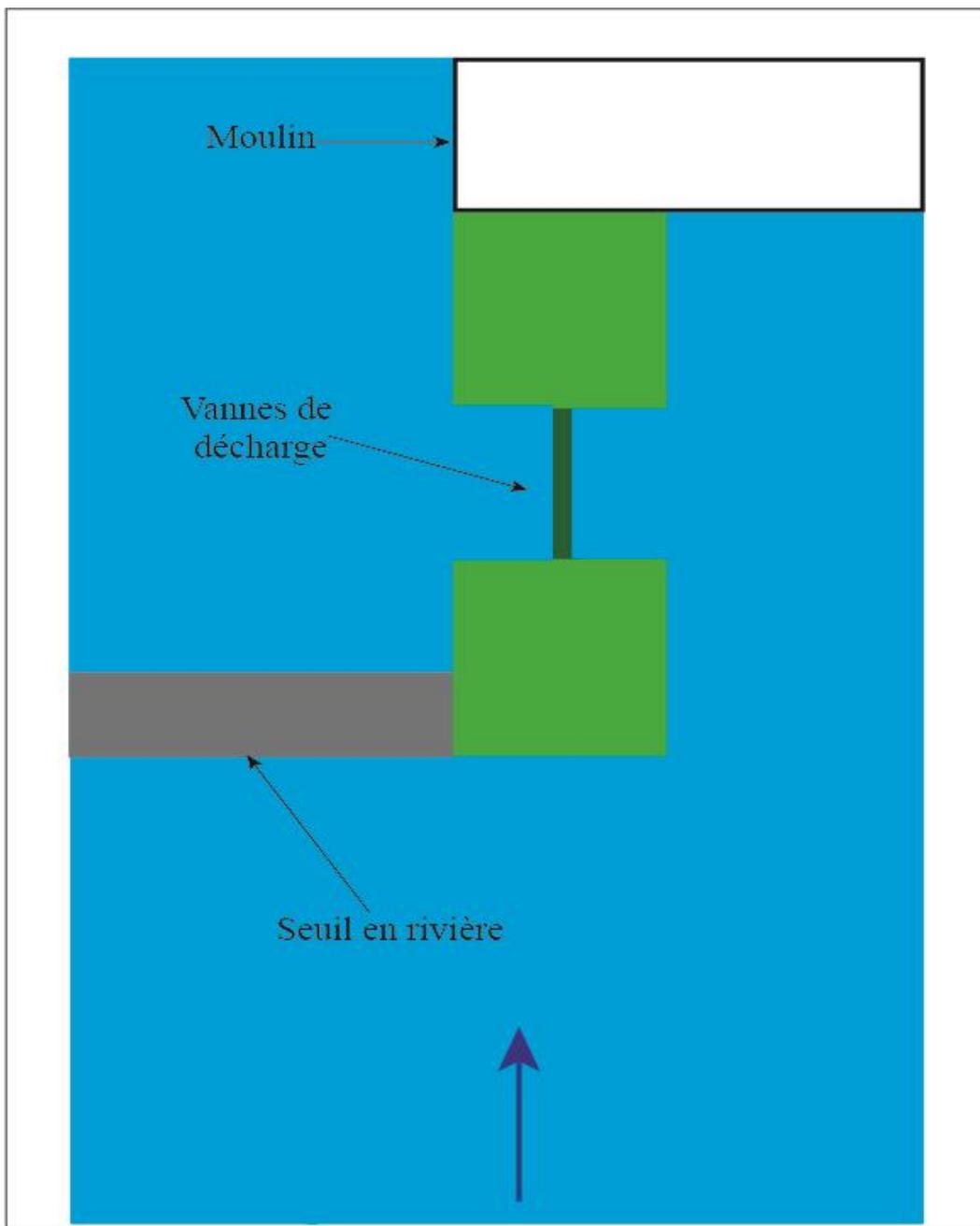


Figure 48 : Schéma résumant la disposition des annexes hydrauliques du moulin de Thévalles (Réalisation : Francesco Donati).

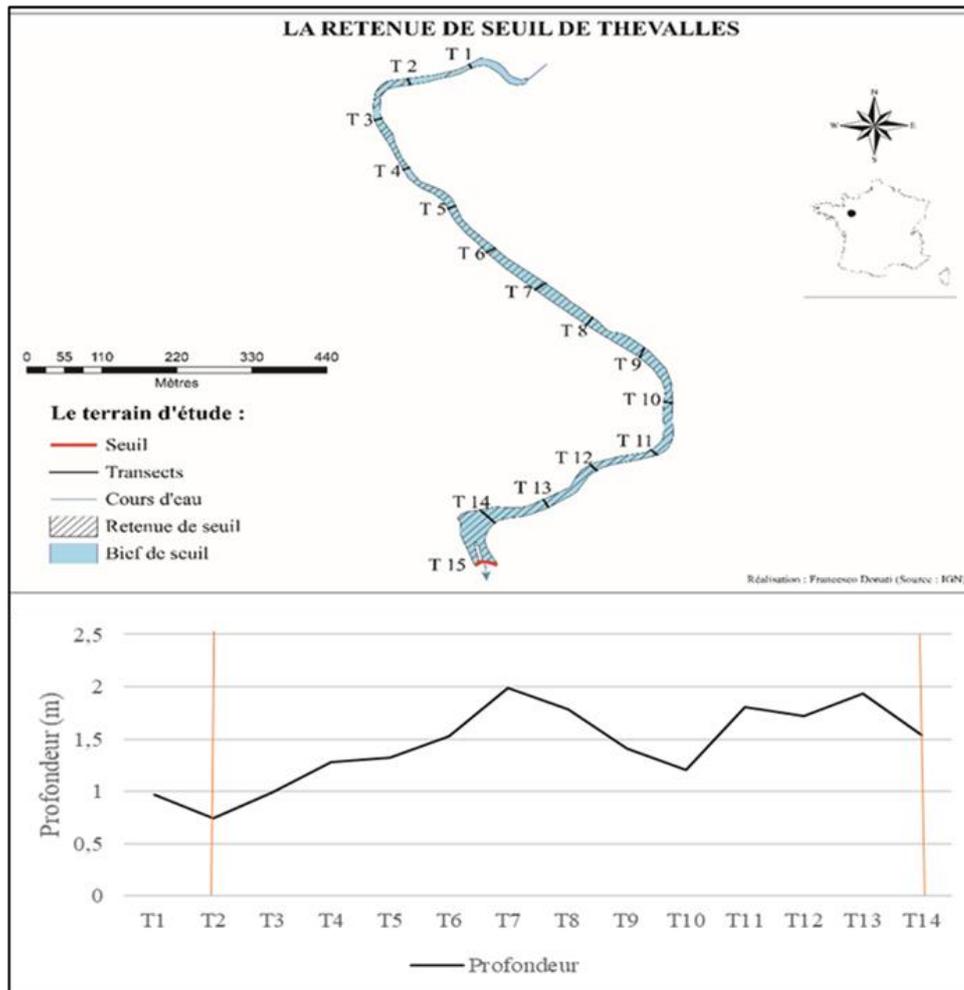


Figure 49 : L'étendue spatiale de la retenue de seuil Thévalles. Les traits rouges matérialisent les limites de la retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati ; source : IGN).

2.3.2 Les caractéristiques de la retenue de seuil de Thévalles

À l'amont de ce seuil en rivière se développe un bief long d'environ 1500 m, orienté Nord-Sud. Dans la presque totalité de cet espace (Transects 2-15) s'étale la retenue de seuil générée par l'ancien moulin, dont la surface est d'environ 2 ha, la largeur moyenne de 13 m et la profondeur moyenne est de 1,55 m (Prof. max. = 2,67 m ; Prof. min. 0,68 m). Comme pour le précédent terrain d'étude, sa délimitation a été facilitée par le fait qu'elle confine à l'amont avec un autre moulin, celui de Pré. Ici aussi un règlement obligeait le meunier du moulin de Thévalles à régler le niveau de son bief à une hauteur préfixée, qui est respectée encore aujourd'hui. Pour cette raison, les effets du seuil de Thévalles s'étendent sur la totalité du bief qui sépare les deux moulins, un fait que la méthodologie que nous avons élaborée pour délimiter le périmètre des retenues de seuil a confirmé (fig. 49). À proximité du transect 14, cette retenue de seuil intercepte les eaux d'un petit ruisseau qui draine une petite prairie humide.

Le seuil en rivière du moulin de Thévalles et la retenue de seuil qu'il forme sont alimentés par l'Erve, affluent de rive droite de la Sarthe long de 71 km, qui coule dans un bassin versant qui s'étale sur l'extrémité Est du Massif armoricain, caractérisé par une occupation du sol principalement agricole (fig. 50). Ce territoire est particularisé par un relief peu prononcé, qui ne dépasse pas les 236 mètres sur le niveau de la mer (fig. 51) et par un sous-sol constitué surtout par des schistes (fig. 52). Le contexte climatique de ce territoire est de type océanique dégradé, avec des hivers doux et des étés chauds (Escourrou, 1982). Selon la station météorologique d'Evron, située à l'intérieur du bassin versant de l'Erve et la plus proche du moulin de Thévalles, pendant la période 1981-2010, la température moyenne a été de 11,4 °C (la température maximale moyenne a été de 16,1 °C et la minimale de 6,8 °C) et le cumul pluviométrique moyen a été de 784,2 mm. D'un point de vue hydrologique, le régime de l'Erve est de type pluvial, avec les hautes eaux pendant les saisons les plus arrosées et les basses eaux pendant celles les plus sèches ; le débit moyen calculé par la station limnimétrique située sur ce cours d'eau (entre 1998 et 2020) est d'environ 0,6 m³/s.

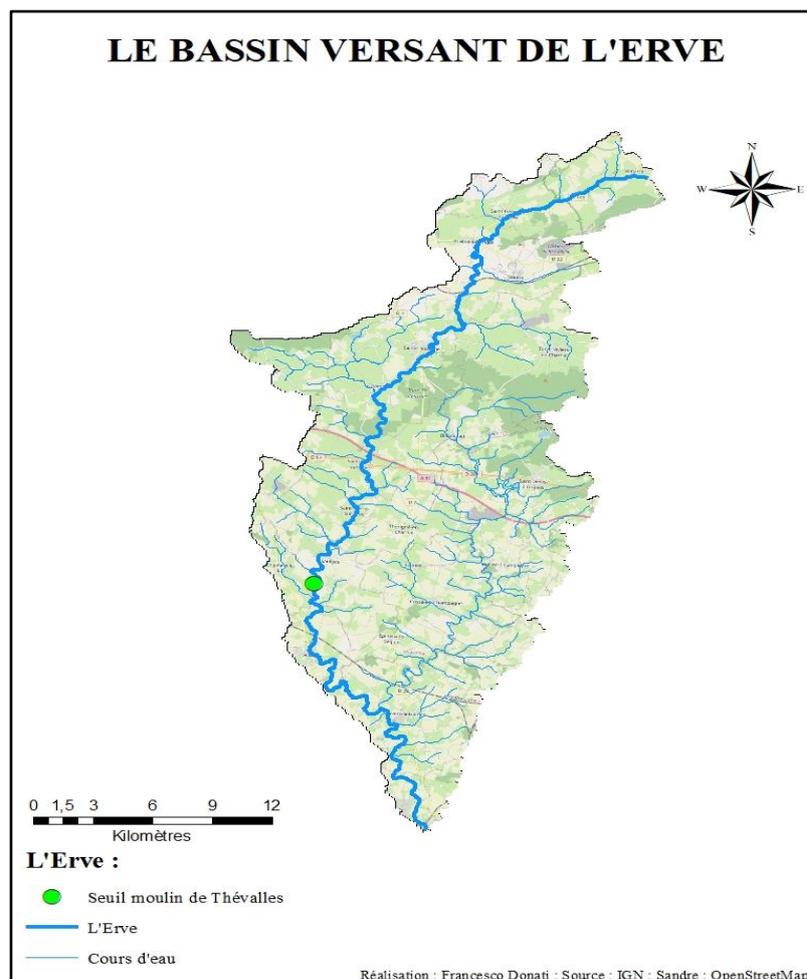


Figure 50 : Le bassin versant de l'Erve et l'emplacement de la retenue de seuil en étude (Réalisation : Francesco Donati).

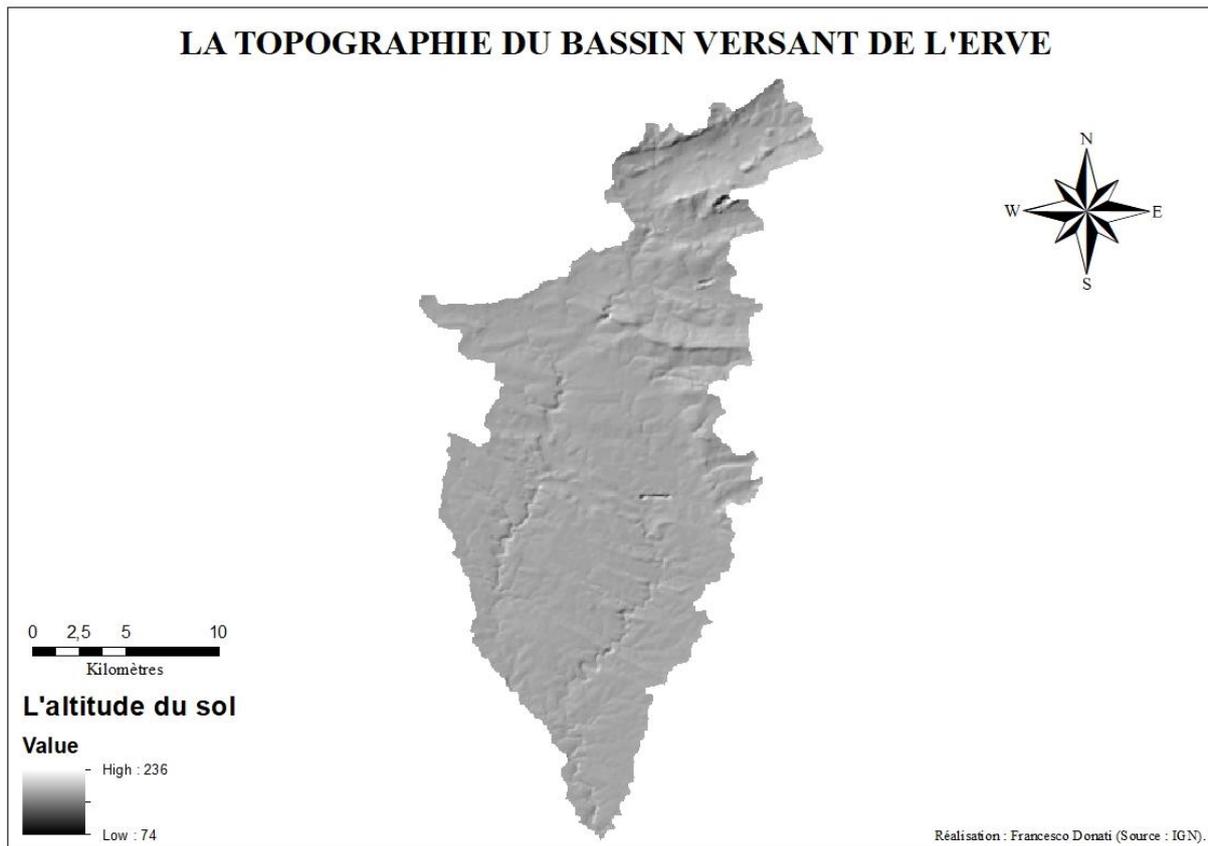


Figure 51 : La topographie du bassin versant de l'Erve (Réalisation : Francesco Donati).

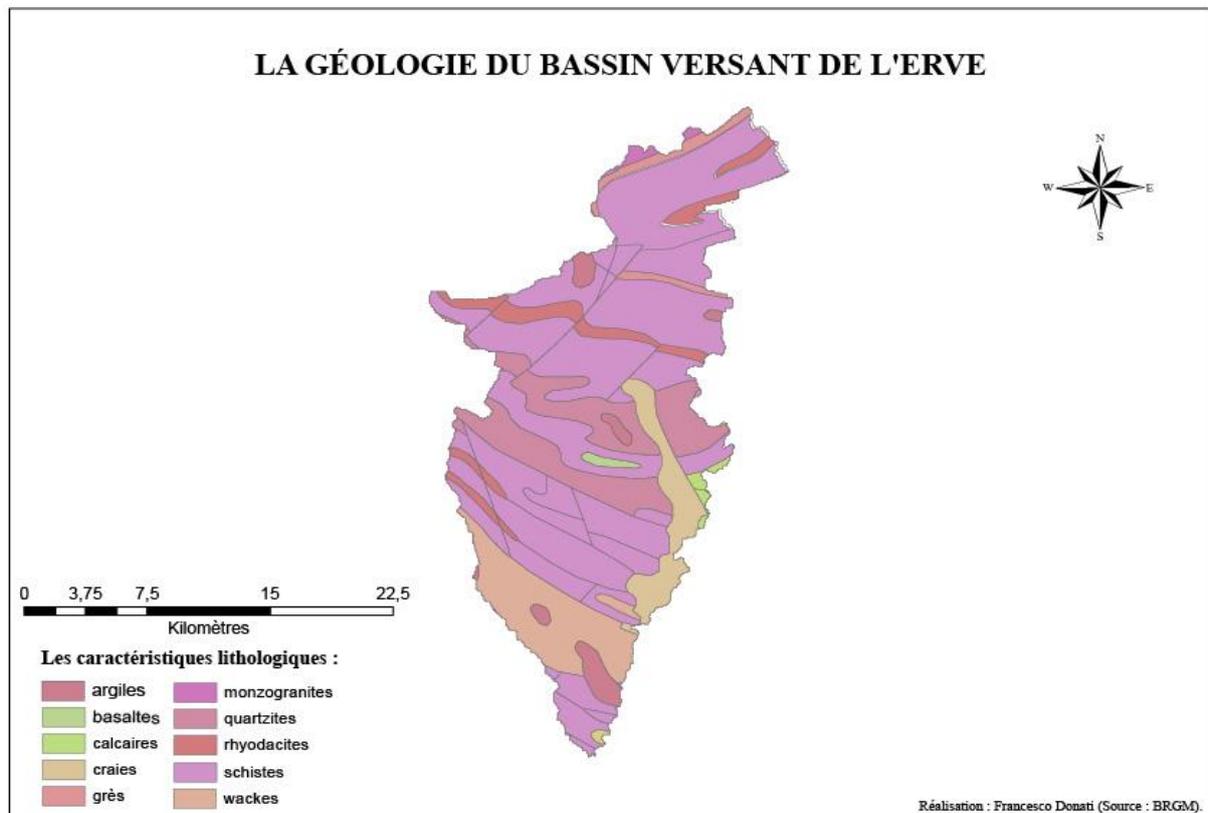


Figure 52 : La géologie du bassin versant de l'Erve (Réalisation : Francesco Donati).

Digne d'intérêt est le contexte historique et environnemental de cette retenue de seuil. En effet, elle se trouve à la sortie du Canyon de Saulges, dans lequel existent plusieurs grottes, qui abritent les seules peintures rupestres préhistoriques observables au Nord de la Loire (fig. 53). L'une de celles-ci était située au niveau du moulin de Thévalles, mais son entrée s'est effondrée à la suite de la construction de la route qui conduit à l'ancienne usine. Malgré cela, de nombreuses études paléontologiques ont été exécutées le long des berges de la retenue de seuil, qui ont permis notamment d'étudier les habitudes des hommes qui l'occupaient et reconstituer les paléoclimats de la vallée.



Figure 53 : Les peintures rupestres dans l'une des grottes du canyon de Saulges, en proximité de la retenue de seuil de Thévalles (Source : Musée de Saulges).

2.3.3 L'application de la méthodologie dans la retenue de seuil de Thévalles

La méthodologie que nous avons élaborée a dû être adaptée aux conditions hydrologiques que nous trouvons dans ce terrain d'étude. Comme on l'a vu plus haut, il est caractérisé par des profondeurs particulièrement importantes, qui n'ont pas permis l'exécution de l'étude des courants qui se développent dans cette retenue de seuil. En effet, le FlowTracker 2 peut analyser les courants uniquement quand la profondeur de l'eau ne dépasse pas les 1,10 m, alors qu'en moyenne le tirant d'eau de cette retenue de seuil mesure 1,55 m, avec des pointes de presque 3 mètres. Toujours pour la même raison, l'étude de la nature des fonds a dû être réalisée grâce à l'utilisation d'une barque. Cela a rendu beaucoup plus compliquées les opérations d'échantillonnage, en raison de la constante dérive vers l'aval de l'embarcation, qui nous a obligé à utiliser des systèmes d'ancrage. Comme on le verra mieux par la suite, le fond de ce terrain d'étude est particulièrement compact, ce qui n'a pas permis de prélever des carottes. En revanche, des échantillons de sédiments ont été prélevés à l'aide d'une benne de type Van-Veen dans certains transects de la retenue de seuil.

Le véritable intérêt de l'étude de la retenue de seuil de Thévalles réside dans son contexte hydrologique-environnemental, qui la rend particulièrement attractive pour les analyses thermiques. En effet, ce terrain d'étude est particularisé par une zone où la ripisylve est complètement absente, au niveau des transects 13-15, situation qui n'existe pas dans les autres terrains d'études ; en outre, les profondeurs qu'il présente sont similaires à celles qu'on peut trouver dans un étang. Ainsi, la retenue de seuil de Thévalles permet d'étudier les caractéristiques thermiques de la colonne d'eau dans des conditions similaires à celles d'un étang et de quantifier quel est l'effet de la ripisylve. Pour cette raison, deux chaînes de thermomètres ont été positionnées dans ce site : une dans la zone complètement exposée au soleil et une autre dans une zone totalement ombragée par la ripisylve, entre les transects 11-12. Dans chaque dispositif, quatre thermomètres ont été fixés, à une profondeur de 0,10, 0,25, 0,50 et 1,50 m. L'analyse des données thermiques a été approfondie en croisant des données relatives à la température de l'eau et celles relatives à plusieurs paramètres météorologiques, mesurés grâce à une station météo installée à proximité du seuil en rivière (fig. 54). Il s'agit d'une station météo de type Davis « Vintage Pro 2 6162CEU », équipée d'un pluviomètre, une sonde de température, une sonde d'humidité, un pyranomètre, un capteur d'UV et un anémomètre.



Figure 54 : La station météo installée en proximité de la retenue de seuil de Thévalles (Photo relayée par Francesco Donati).

Ainsi, l'application de la méthodologie dans ces trois terrains d'étude a amené à la collecte d'un grand nombre de données prévenants des compartiments thermiques, hydrodynamiques et sédimentaires de ces trois terrains d'études, qui ont permis de comprendre comment ces retenues de seuil fonctionnent.

3. LES RÉSULTATS OBTENUS DANS LES TROIS RETENUES DE SEUIL EN ÉTUDE

L'application de la méthodologie dans les retenues de seuil de Baerenthal, Saint-Hilaire et Thévalles a permis de collecter un total 176994 températures horaires de l'eau, réaliser 17 campagnes de mesures hydrodynamiques et 10 de mesures sédimentaires. Malheureusement, les mesures ont été perturbées par plusieurs cas de force majeure, qui ont limité le nombre d'échantillons collectés et engendré des trous temporels plus ou moins importants dans les séries de données. Parmi eux, les plus contraignants ont été : deux crues consécutives qui ont eu lieu sur l'Erve et qui ont provoqué en l'espace de quelques mois la perte à jamais de plusieurs thermomètres enregistreurs et des données qu'ils stockaient, la décharge ou l'arrêt soudain de ce même type de sonde et deux graves pannes du courantomètre FlowTracker 2, qui de ce fait a été indisponible de juillet 2019 jusqu'à mars 2020 et de novembre 2020 jusqu'à mars 2021. À ces problèmes après tout communs aux études exécutées sur le terrain, il faut en ajouter un sans doute inédit : la crise sanitaire liée au virus Covid-19, qui a empêché tout déplacement sur le terrain pour une large partie de la troisième année de thèse. Malgré tout, des résultats ont pu être obtenus, permettant de mieux comprendre le fonctionnement des retenues de seuils que nous avons sélectionnées pour cette étude.

3.1 Les résultats obtenus à l'amont de la retenue de seuil de Saint-Hilaire, archétype d'une retenue de seuil par un ouvrage de faible hauteur (0,5 m)

Dans la retenue de seuil de Saint-Hilaire, l'analyse des caractéristiques abiotiques a démarré en février 2018 et elle s'est conclue en septembre 2020. Pendant cette période ont été collectées 60892 températures horaires de l'eau, effectuées douze campagnes de mesures hydrodynamiques et trois de mesures bathymétriques-sédimentaires. Les deux chaînes de thermomètres positionnées dans ce terrain d'étude ont été celles les plus touchées par le dysfonctionnement des thermomètres mentionné au début de ce chapitre : dans celle la plus en aval, il a occasionné la perte totale d'une bonne partie des températures collectées au cours de l'automne et de l'hiver 2019. Les caractéristiques hydrodynamiques ont été examinées environ une fois par mois, à l'exclusion des périodes au cours desquelles le FlowTracker 2 a été indisponible et celles où étaient en vigueur les restrictions liées à l'épidémie du Covid-19. Les caractéristiques bathymétriques-sédimentaires ont été analysées sans rencontrer des difficultés.

3.1.1 Les résultats de l'étude thermique

À l'aval de la retenue de seuil de Saint-Hilaire, les données collectées par la chaîne de thermomètres n'ont pas relevé l'existence de gradients thermiques verticaux remarquables entre la surface et le fond de la colonne d'eau. En effet, pour quasiment toute la période d'étude, ce paramètre a montré des valeurs nulles, à exception de certains courts moments qui ont eu lieu notamment pendant les saisons estivales (tab. 1 et fig. 55).

Tableau 1 : Le gradient thermique verticale moyen, maximale positif et maximale négatif entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'aval de la retenue de seuil de Saint-Hilaire au cours des saisons.

	GRAD. MOY.	GRAD. MAX. POSITIF	GRAD. MAX. NÉGATIF
Hiver 2018	0,0	0,0	0,0
Printemps 2018	0,0	1,0	0,0
Été 2018	0,0	0,8	0,0
Automne 2018	0,0	0,4	0,0
Hiver 2019	0,0	0,5	0,0
Printemps 2019	0,0	0,5	0,0
Été 2019	0,1	1,0	0,0
Automne 2019	/	/	/
Hiver 2020	0,0	0,0	0,0
Printemps 2020	0,0	0,0	0,0
Été 2020	0,0	0,4	0,0

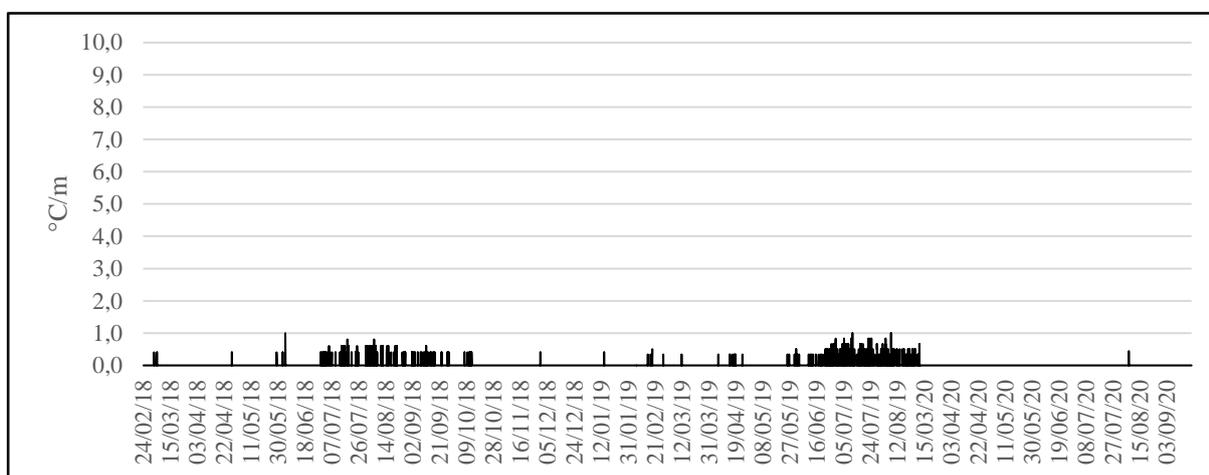


Figure 55 : Le gradient thermique entre la surface et le fond à l'aval de la retenue de seuil de Saint-Hilaire pendant toute la période d'étude (Réalisation : Francesco Donati).

Ces chiffres s'expliquent en examinant le Δ° , qui montre que, comme pour la plus grande partie de la période d'étude, la colonne d'eau a été thermiquement homogène, sauf pendant de rares occasions où de faibles différences de température entre la surface et le fond se sont mises en place (tab. 2 et fig. 56). Entre le 24/02/2018 et le 31/12/2018, le Δ° moyen a été de 0,0 $^\circ\text{C}$: les moments caractérisés par un $\Delta^\circ \neq 0$ représentent 0,3 % de l'hiver, 0,3 % du printemps, 4,8

% de l'été et 0,6 % de l'automne. Ils ont eu lieu principalement en début d'après-midi (entre 13:00 et 14:00) et leur durée moyenne a été d'une heure, sauf en été où elle a atteint les deux heures. Durant les mois hivernaux, le Δ° le plus fort observé est de 0,2 °C, pendant les mois printaniers de 0,5 °C, pendant les mois estivaux de 0,4 °C et pendant ceux d'automne de 0,2 °C. La journée marquée par le plus grand nombre d'heures de $\Delta^\circ \neq 0$ a été celle du 05/08/2018, au cours de laquelle a été observée une différence thermique entre la surface et le fond de la colonne d'eau de 5 heures consécutives (Δ° maximal = 0,3 °C). Entre le 01/01/2019 et le 29/08/2019, le Δ° moyen a été de 0,0 °C : les moments caractérisés par un $\Delta^\circ \neq 0$ représentent 0,2 % de l'hiver, 2 % du printemps, et 10,3 % de l'été. Ils se sont vérifiés principalement en début d'après-midi (entre 12:00 et 13:00) et leur durée moyenne a été d'une heure, sauf en été où cette valeur a atteint les trois heures. Durant les mois hivernaux et printaniers, le Δ° le plus fort qui a été observé est de 0,3 °C et pendant les mois estivaux de 0,6 °C. Les journées marquées par le plus grand nombre d'heures de $\Delta^\circ \neq 0$ ont été celles du 17/06/2019 et du 24/07/2019, au cours desquelles a été observée une différence thermique entre la surface et le fond de la colonne d'eau de 6 heures non consécutives (respectivement, Δ° maximal = 0,4 °C et 0,5 °C). Entre le 13/03/2020 et le 20/09/2020, le Δ° moyen a été de 0,0 °C : les moments caractérisés par un $\Delta^\circ \neq 0$ représentent 0 % de l'hiver, du printemps et de l'été. Le seul moment d'hétérogénéité thermique de la colonne d'eau observé au cours de cette période (le 11/08/2020) a été constaté en début d'après-midi (à 13:00) et il a duré une heure seulement ($\Delta^\circ = 0,3$ °C).

Tableau 2 : Le Δ° moyen, minimale et maximale entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'aval de la retenue de seuil de Saint-Hilaire au cours des saisons.

	Δ° MOY.	Δ° MAX.	Δ° MIN.
Hiver 2018	0,0	0,2	0,0
Printemps 2018	0,0	0,5	0,0
Été 2018	0,0	0,4	0,0
Automne 2018	0,0	0,2	-0,2
Hiver 2019	0,0	0,3	0,0
Printemps 2019	0,0	0,3	0,0
Été 2019	0,0	0,6	0,0
Automne 2019	/	/	/
Hiver 2020	0,0	0,0	0,0
Printemps 2020	0,0	0,0	0,0
Été 2020	0,0	0,3	0,0

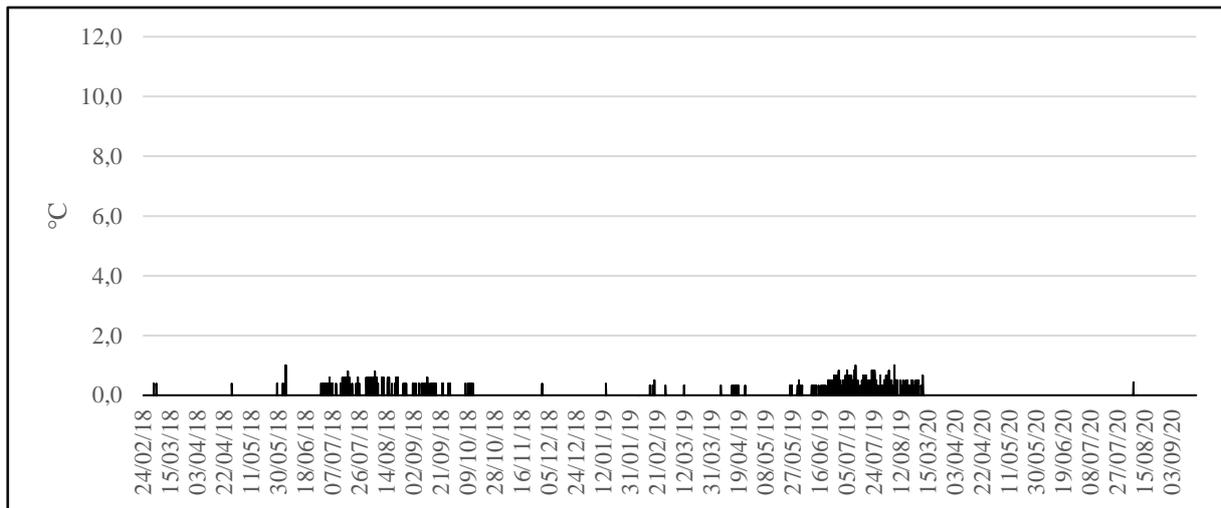


Figure 56 : Le Δ° entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'aval de la retenue de seuil de Saint-Hilaire au cours de toute la période d'étude.

Même à l'amont de la retenue de seuil, les données collectées par la chaîne de thermomètres n'ont pas relevé l'existence de gradients thermiques verticaux remarquables entre la surface et le fond de la colonne d'eau. En effet, ici aussi, pendant quasiment toute la période d'étude, ce paramètre a assumé des valeurs nulles (la moyenne est égale à 0,0 °C/m), à l'exception de courts moments où ils sont légèrement plus élevés (tab. 3 et fig. 57).

Tableau 3 : Le gradient thermique verticale moyen, maximale positif et maximale négatif (en °C) entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'amont de la retenue de seuil de Saint-Hilaire au cours des saisons.

	GRAD. MOY.	GRAD. MAX. POSITIF	GRAD. MAX. NÉGATIF
Hiver 2019	0,0	0,5	0,0
Printemps 2019	0,0	0,5	0,0
Été 2019	0,0	1,0	0,0
Automne 2019	0,0	0,5	0,0
Hiver 2020	0,0	0,0	0,0
Printemps 2020	0,0	0,3	0,0
Été 2020	0,0	0,5	0,0

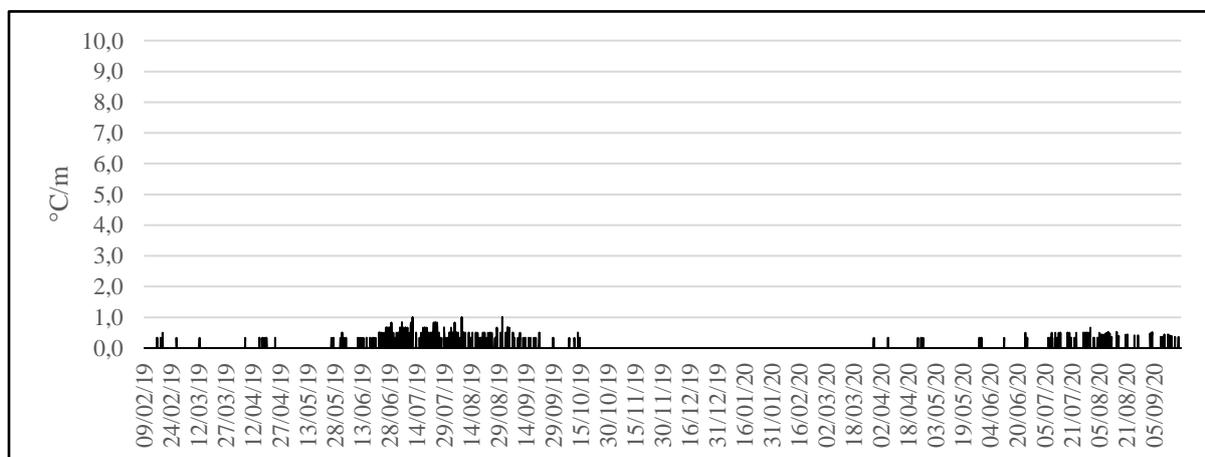


Figure 57 : Le gradient thermique entre la surface et le fond à l'amont de la retenue de seuil de Saint-Hilaire pendant toute la période d'étude (Réalisation : Francesco Donati).

Dans ce cas aussi, ces chiffres sont explicables en examinant le Δ° qui montre comment, pendant la plus grande partie de la période d'étude, la colonne d'eau a été thermiquement homogène, sauf en de rares occasions où elle a présenté de très faibles stratifications (tab. 4 et fig. 58). Entre le 09/02/2019 et le 31/12/2019, le Δ° moyen a été de 0,0 °C : les moments caractérisés par un $\Delta^\circ \neq 0$ représentent 0,5 % de l'hiver, 1 % du printemps, 9,1 % de l'été et 0,4 % de l'automne. Durant les mois hivernaux, le plus fort Δ° observé est de 0,3 °C, pendant ceux d'été de 0,6 °C et pendant ceux d'automne de 0,3 °C. Ils se sont produits principalement vers la fin de la matinée (entre 11:00 et 13:00) et leur durée moyenne a été d'une heure, sauf en été où elle a atteint les deux heures. Les journées marquées par le plus grand nombre d'heures de $\Delta^\circ \neq 0$ ont été celles du 17/07/2019 et du 24/07/2019, au cours desquelles a été observée une différence thermique entre la surface et le fond de la colonne d'eau de 6 heures non consécutives (respectivement, Δ° maximal = 0,4 °C et 0,7 °C). Entre le 01/01/2020 et le 20/09/2020, le Δ° moyen a été de 0,0 °C : les moments caractérisés par un $\Delta^\circ \neq 0$ représentent 0 % de l'hiver, 0,4 % du printemps et 2 % de l'été. Durant les mois hivernaux et printaniers le Δ° le plus fort qui a été observé est de 0,2 °C et pendant ceux d'été de 0,3 °C. Ils ont été observés principalement en début d'après-midi (entre 13:00 et 14:00) et leur durée moyenne a été d'une heure, au cours de toutes les saisons. La journée marquée par le plus grand nombre d'heures de $\Delta^\circ \neq 0$ a été celle du 30/07/2020, au cours de laquelle a été observée une différence thermique maximale entre la surface et le fond de la colonne d'eau de 4 heures consécutives (Δ° maximale = 0,3°C).

Tableau 4 : Le Δ° moyen, minimale et maximale entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'amont de la retenue de seuil de Saint-Hilaire au cours des saisons.

	Δ° MOY.	Δ° MAX.	Δ° MIN.
Hiver 2019	0,0	0,3	0,0
Printemps 2019	0,0	0,3	0,0
Été 2019	0,0	0,6	0,0
Automne 2019	0,0	0,3	0,0
Hiver 2020	0,0	0,0	0,0
Printemps 2020	0,0	0,2	-0,3
Été 2020	0,0	0,3	0,0

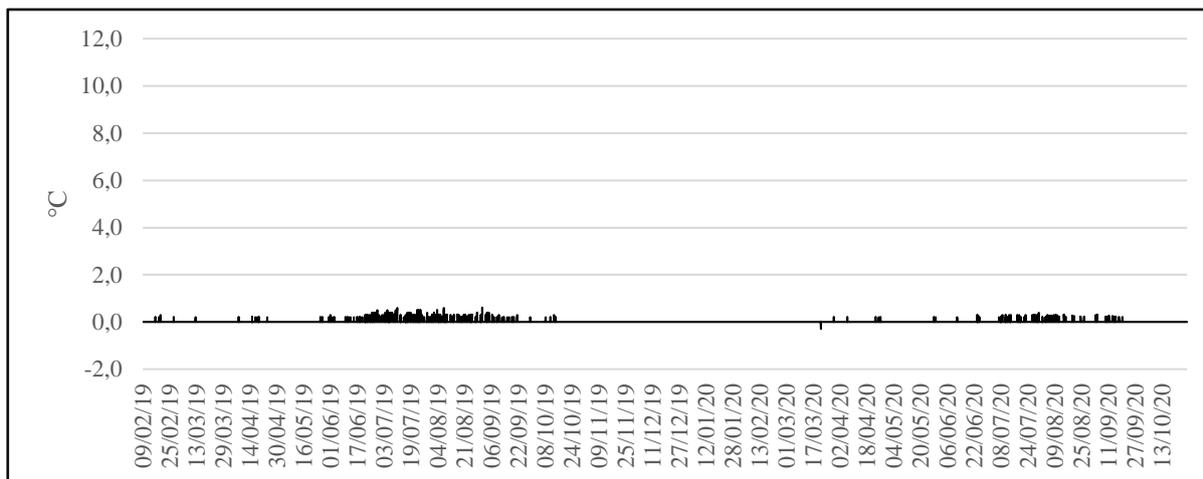


Figure 58 : Le Δ° entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'amont de la retenue de seuil de Saint-Hilaire au cours de toute la période d'étude (Réalisation : Francesco Donati).

À l'aval comme à l'amont, l'uniformité thermique de la colonne d'eau et la faiblesse des stratifications thermiques observées au cours de la période d'étude sont confirmées par une analyse plus détaillée de l'évolution de la température aux différentes profondeurs. En effet, pendant toute la période d'étude, les cycles thermiques journaliers sont quasiment identiques dans les différents niveaux de la colonne d'eau (tab. 5 et 6).

Tableau 5 : L'amplitude thermique moyenne (en °C) aux différents niveaux de la colonne d'eau à l'aval de la retenue de seuil de Saint-Hilaire.

	-0,1 m	-0,5 m
Hiver 2018	1,7	1,7
Printemps 2018	1,8	1,8
Été 2018	1,9	1,9
Automne 2018	1,1	1,1
Hiver 2019	1,4	1,4
Printemps 2019	2,2	2,2
Été 2019	2,5	2,2
Automne 2019	/	/
Hiver 2020	2,3	2,3
Printemps 2020	2,1	2,1
Été 2020	1,8	1,8

Tableau 6 : L'amplitude thermique moyenne (en °C) aux différents niveaux de la colonne d'eau à l'amont de la retenue de seuil de Saint-Hilaire.

	-0,1 m	-0,5 m
Hiver 2019	1,9	1,9
Printemps 2019	2,0	2,0
Été 2019	2,0	2,0
Automne 2019	0,9	0,9
Hiver 2020	1,3	1,3
Printemps 2020	2,0	2,0
Été 2020	1,6	1,6

Les légères stratifications thermiques de la colonne d'eau qui se forment à l'aval et à l'amont de la retenue de seuil se produisent toujours au cours de l'été, quand le débit des Mauves est le plus faible. Elles semblent être engendrées par une plus forte sensibilité des eaux superficielles aux variations de la température atmosphérique. Les deux cas suivants montrent concrètement les vicissitudes thermiques qui se produisent au sein de la retenue. Le premier exemple est celui qui concerne la journée du 05/08/2018 à l'aval de la retenue et il est indicatif de l'influence de la température de l'air sur celle de l'eau (fig. 59) :

- Entre 0:00 et 5:00, la température de l'air se refroidit, passant de 21,6 °C à 17,4 °C. À cela correspond une diminution de la température de l'eau à toutes les profondeurs, qui passe de 19,7 °C à 19,1 °C en surface et de 19,7 °C à 19,0 °C en profondeur.
- À partir de 6:00, la température de l'air commence à augmenter, atteignant les 26,5 °C à 10:00. Pendant ce laps de temps, la température de l'eau se stabilise tout au long de la colonne d'eau, s'affichant autour des 18,7 °C à toutes les profondeurs.
- Entre 10:00 et 16:00, la température de l'air continue d'augmenter atteignant la valeur maximale de 31,9 °C. L'eau aussi commence à se réchauffer, mais de façon inégale, l'eau à la surface de la colonne d'eau se réchauffant davantage que celle en profondeur.
- Entre 17:00 et 18:00, quand la température de l'air commence à baisser, celle de l'air l'eau aussi commence à diminuer, redevenant homogène à toutes les profondeurs au cours de la nuit.

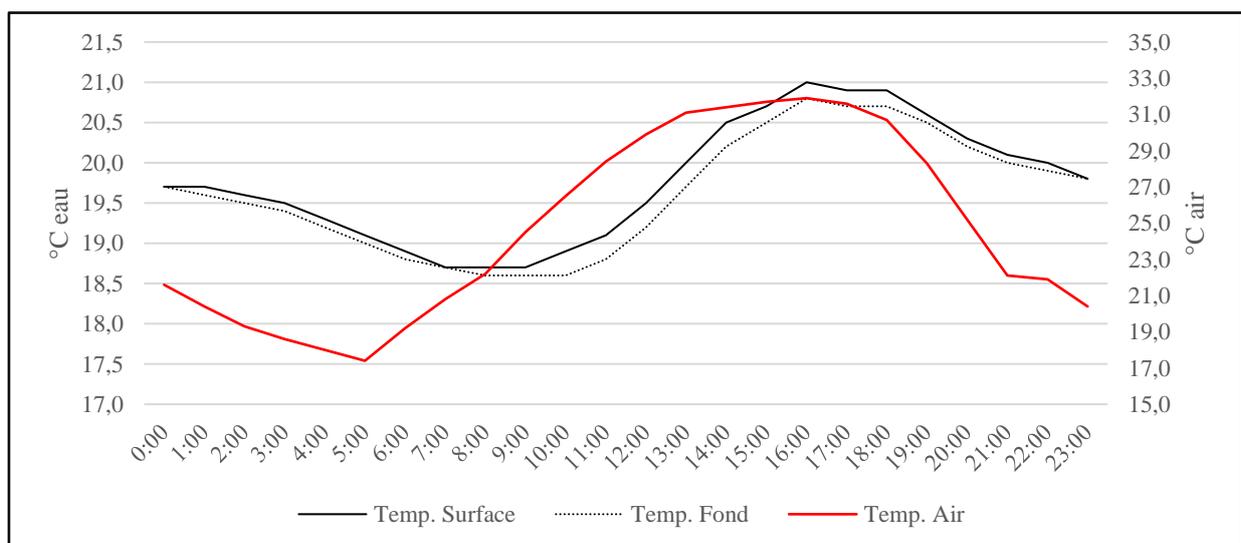


Figure 59 : L'évolution de la température de l'eau et de l'air le 05/08/2018 à l'aval de la retenue de seuil de Saint-Hilaire (Réalisation : Francesco Donati).

Le second exemple est celui qui concerne la journée du 11/07/2019 à l'amont de la retenue et il est lui aussi indicatif de l'influence de la température de l'air sur celle de l'eau, notamment sur la couche la plus superficielle (fig. 60) :

- Entre 0:00 et 5:00, la température de l'air se refroidit, passant de 19,1 °C à 16,7 °C. À cela correspond une diminution de la température de l'eau, qui passe de 17,9 °C à 17,1 °C à toutes les profondeurs.
- À partir de 6:00, la température de l'air commence à augmenter, atteignant les 23,6 °C à 09:00. Pendant ce laps de temps, la température de l'eau se stabilise tout au long de la colonne d'eau, s'affichant autour de 17,0 °C à toutes les profondeurs.
- Entre 10:00 et 16:00, la température de l'air continue d'augmenter atteignant la valeur maximale de 28,9 °C. L'eau aussi commence à se réchauffer, mais de façon inégale, l'eau à la surface de la colonne se réchauffant davantage que celle en profondeur. Pendant cette phase la température de l'eau et celle de l'air progressent de façon très similaire, comme on peut le voir sur le graphique qui suit, où les deux courbes sont quasiment égales.

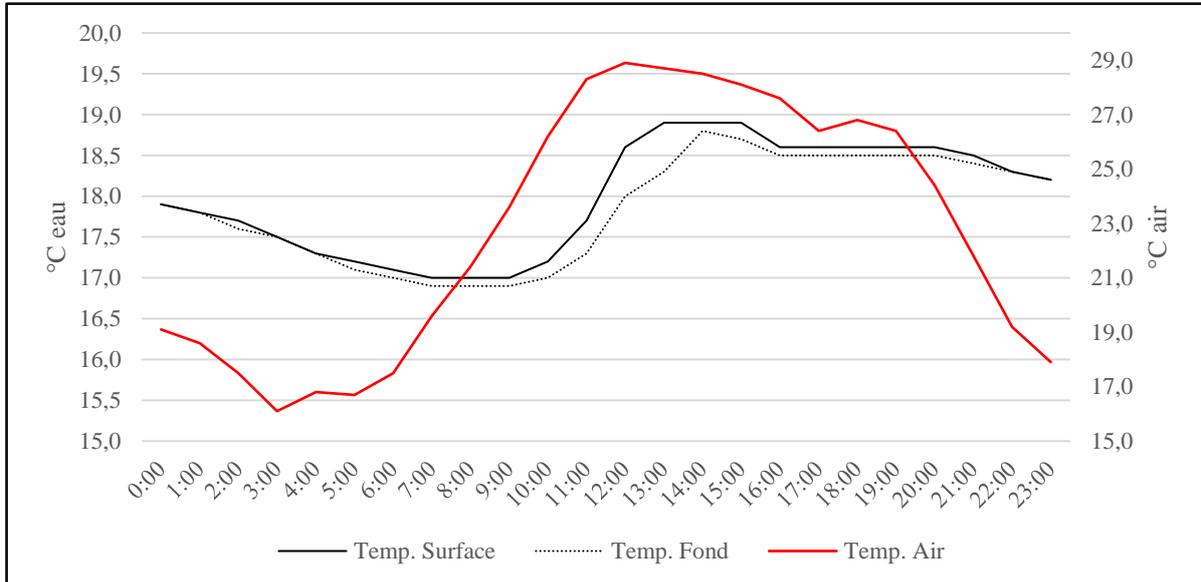


Figure 60 : L'évolution de la température de l'eau et de l'air à l'amont de la retenue de seuil de Saint-Hilaire le 11/07/2018 (Réalisation : Francesco Donati).

Pour résumer, les résultats de l'étude thermique effectuée à l'amont du petit seuil en rivière de Saint-Hilaire montrent que la colonne d'eau de ce type de retenue de seuil semblerait rester quasi parfaitement homogène tout au long des saisons d'une année, à exception de l'été, quand de très légères variations de température entre la surface et le fond se forment en milieu

de journée. La durée et l'intensité de ces moments sont peu importants, car ils ne durent que quelques heures et ne dépassent jamais 1°C de différence entre les différents niveaux de la colonne d'eau. Ce fonctionnement thermique est identique dans les deux stations de mesure installées dans ce terrain d'étude. Mais qu'en est-il du fonctionnement hydrodynamique de ce type de retenue de seuil ?

3.1.2 Les résultats de l'étude hydrodynamique

L'étude de la direction des flux d'eau n'a pas démontré l'existence de courants pluridirectionnels au sein de la retenue de Saint-Hilaire, mais au contraire, il a mis en évidence la présence d'un écoulement qui la traverse longitudinalement, dans la direction amont-aval (fig. 61 et tab. 7). En effet, l'ouverture des angles des vitesses a toujours été comprise entre 0° et ±90° et l'angle de vitesse moyen dans cette retenue de seuil est de 3,96° : les plus grands ont été observés dans le premier transect à l'amont (T1) et ceux les plus proches de 0° dans les transects juste en aval (T3, T4 et T5). Dans ce terrain d'étude, a été également mesuré le seul angle de vitesse compris entre ±90° et ±180° de toutes les campagnes de mesures effectuées au cours de cette recherche : son ouverture est de -120° et il a été mesuré dans la verticale la plus proche de T1. Des variations temporelles évidentes de ce paramètre n'ont pas été constatées, celui-ci restant constant tout au long des saisons.

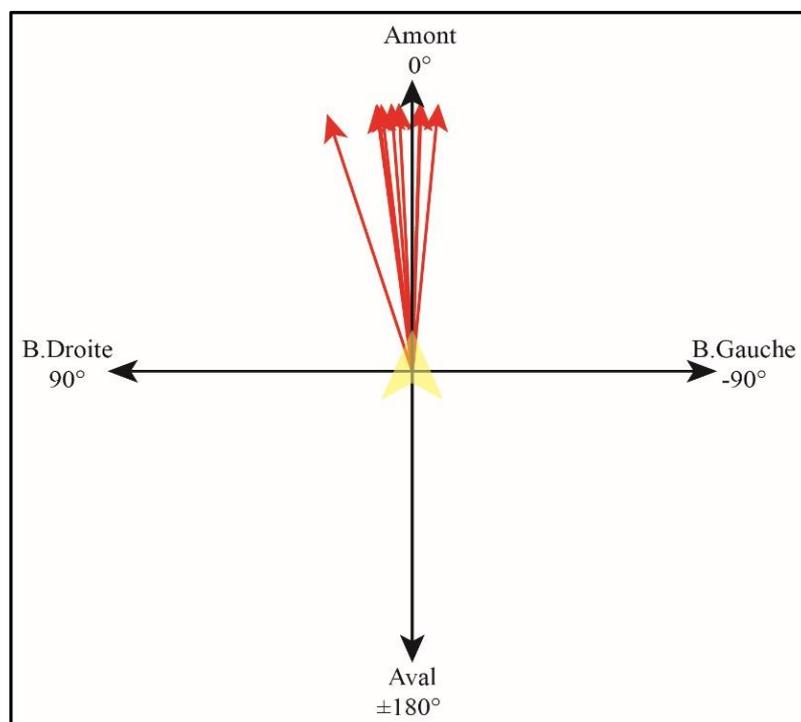


Figure 61 : Les vecteurs qui matérialisent la direction de l'écoulement dans les différents transects à l'intérieur de la retenue de seuil de Saint-Hilaire (Réalisation : Francesco Donati).

Tableau 7 : L'angle de vitesse moyen dans tous les transects qui subdivisent le terrain d'étude de Saint-Hilaire.

L'ANGLE DE VITESSE MOYEN EN °												
T1	T2	T3	T4	T5	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
17,0	7,2	-1,7	-1,7	-1,5	7,2	7,0	2,8	-5,1	6,9	6,2	7,0	4,2

Si on croise les angles des vitesses mesurés dans la retenue de seuil de Saint-Hilaire et la morphologie de celle-ci, on remarque que la direction de l'écoulement suit parfaitement cette dernière :

- Les valeurs les plus élevées mesurées dans T1 sont explicables par le fait qu'il se situe immédiatement en aval d'un autre seuil en rivière, qui confère aux eaux une forte énergie et turbulence. Cela, conjointement à la conformation du fond dans ce secteur, composé principalement par des sédiments très grossiers, peut expliquer les ouvertures des angles observées dans cette zone.
- Les valeurs mesurées dans T2 et T8 indiquent un flux d'eau qui provient de la berge droite et cela est cohérent avec les méandres que la retenue dessine dans ces secteurs.
- Les valeurs mesurées dans T10, au contraire, indiquent un flux qui provient de la berge gauche et cela est cohérent avec le fait que, dans ce secteur, la retenue reçoit les eaux d'un petit chenal, qui se jette dans le terrain d'étude en berge gauche.
- Les valeurs mesurées dans tous les autres transects indiquent un écoulement quasi parfaitement rectiligne, conforme à la morphologie de la retenue de seuil dans ces zones.

À l'intérieur de la retenue de seuil de Saint-Hilaire, le nombre de Froude présente des valeurs inférieures à 0,15, comme ceux qu'on observe dans les mouilles des cours d'eau (fig. 62). Les valeurs de Fr les plus élevées ont été observées au niveau de T1 où les eaux présentent une plus forte énergie, tombant du seuil en rivière du moulin de Pantin. Les valeurs de Fr les plus petites ont été mesurées au niveau de T5 où les eaux présentent l'énergie la plus faible. Dans les autres transects, les valeurs de Fr sont à peu près uniformes, se situant en moyenne autour de 0,04. Dans ce cas aussi, d'évidentes variations saisonnières n'ont pas été observées, la vitesse de l'écoulement et la profondeur au cours des saisons ne variant pas considérablement.

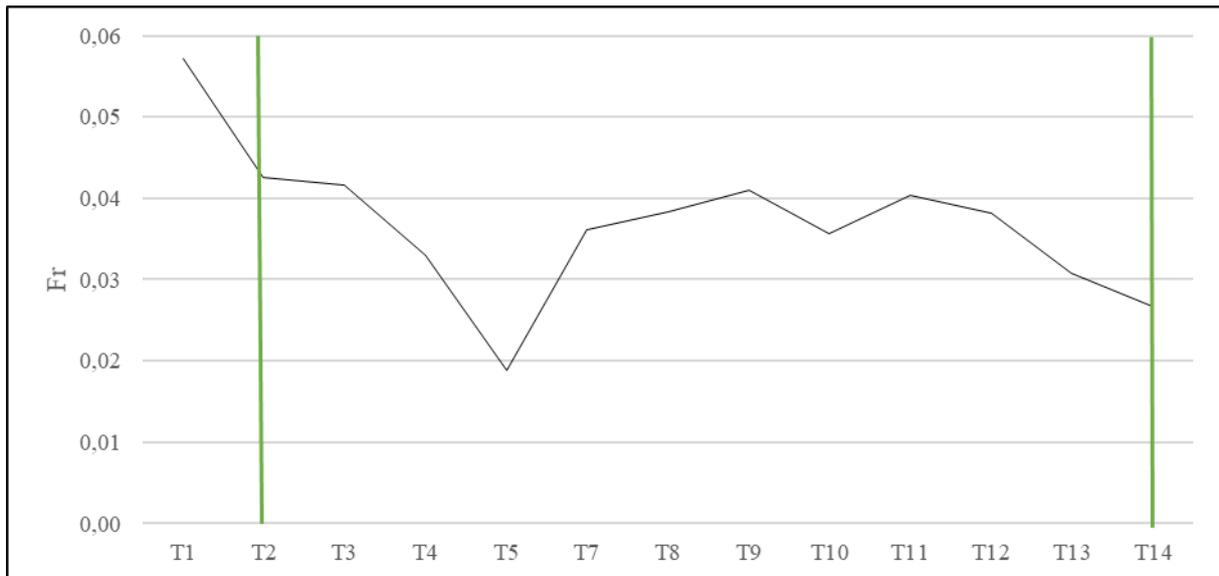


Figure 62 : Le nombre de Froude moyen dans tous les transects qui subdivisent le terrain d'étude de Saint-Hilaire ; les traits rouges représentent les limites de la retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati).

Les jaugeages effectués au cours des différentes campagnes de mesure ont permis de mesurer un débit moyen qui alimente la retenue de seuil de $0,458 \text{ m}^3/\text{s}$, c'est-à-dire $1648,8 \text{ m}^3/\text{h}$. Cette donnée, mise en relation, avec celle concernant le volume de la retenue de seuil (qui on le rappelle est de 2711 m^3) ont permis d'estimer un temps de séjour moyen des eaux de 1,6 heure.

Pour résumer, les résultats de l'étude hydrodynamique effectuée à l'amont du petit seuil en rivière de Saint-Hilaire sembleraient montrer que, dans ce type de retenue de seuil, l'écoulement se déplace uniquement dans la direction amont-aval, des courants pluridirectionnels n'ayant jamais été observés tout au long de la période d'étude. Ces flux d'eau sont caractérisés par une faible énergie, comme le montrent les valeurs moyennes de Fr qui ne dépassent jamais les 0,05. Les temps de séjour des eaux sont globalement très courts, dépassant de très peu l'échelle horaire. Mais qu'en est-il du fonctionnement sédimentaire de ce type de retenue de seuil ?

3.1.3 Les résultats de l'étude sédimentaire

À l'intérieur de la retenue de seuil de Saint-Hilaire, la vitesse moyenne de l'écoulement est de $0,09 \text{ m/s}$. Dans les deux transects situés immédiatement après le moulin de Pantin, l'écoulement présente les vitesses les plus fortes et c'est ici qu'on enregistre la vitesse moyenne la plus élevée, c'est-à-dire $0,16 \text{ m/s}$. Au fur et à mesure qu'elles progressent dans la retenue, les eaux décélèrent, atteignant leur vitesse la plus faible au niveau de T5, l'endroit où on enregistre la vitesse moyenne la plus faible de tout ce terrain d'étude, $0,05 \text{ m/s}$. En aval de ce secteur, la

retenue se rétrécit, engendrant une légère accélération de l'écoulement, dont la vitesse restera à peu près constante jusqu'au moulin ; dans cette zone la vitesse moyenne est de 0,10 m/s. Quand on les croise avec le diagramme de Hjulström, ces chiffres permettent d'avoir un aperçu sur la compétence de l'écoulement qui traverse ce terrain d'étude (fig. 63). Dans les transects 1 et 2, les eaux n'ont la force d'éroder aucun type de particule, mais leur énergie leur permet de transporter celles dont la taille ne dépasse pas les 3 mm, ce qui, dans l'échelle granulométrique de Wentworth correspond aux graviers fins. Dans les transects qui se trouvent sous l'influence du seuil en rivière, on assiste à un changement de compétence, qui concerne principalement le transport des particules dont la taille ne dépasse pas les 1 mm, valeur qui, dans l'échelle granulométrique de Wentworth, correspond aux sables grossiers.

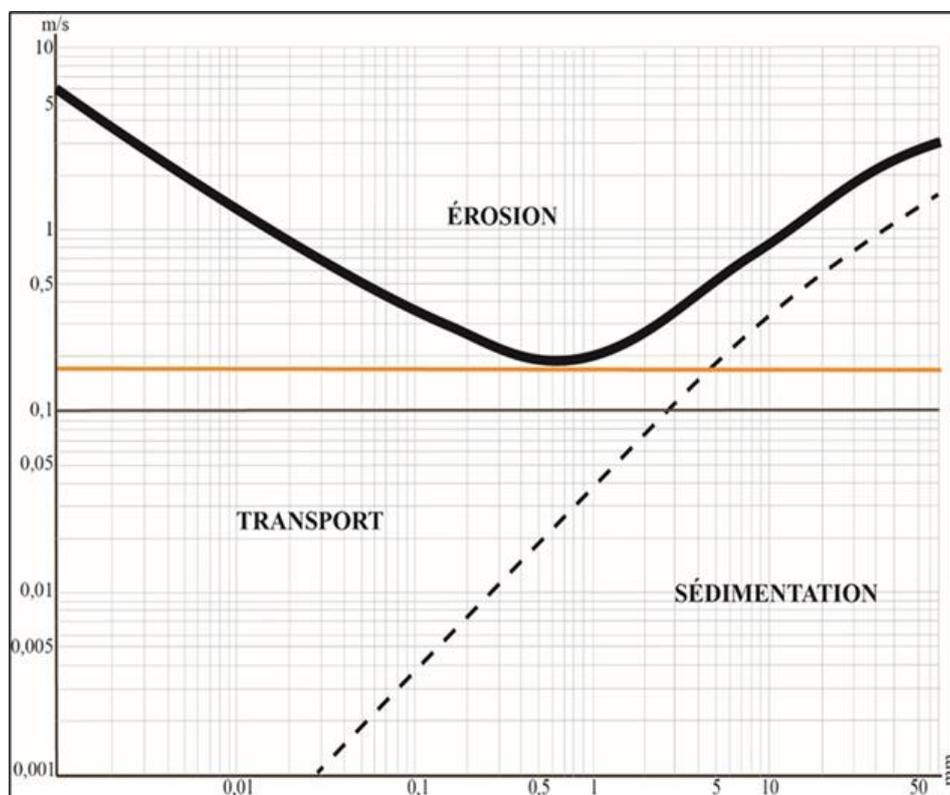


Figure 63 : L'épaisseur moyenne de la couche de sédiments qui recouvre les fonds de la retenue de seuil de Saint-Hilaire, les traits rouges représentent les limites de la retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati).

Les données bathymétriques collectées dans ce terrain d'étude montrent l'existence d'une strate de particules qui recouvre les fonds de la retenue de seuil, dont l'épaisseur semblerait varier en fonction de la vitesse des eaux (fig. 64). Au niveau de T1, où on enregistre les vitesses les plus fortes, la couche de sédiments est absente. Au fur et à mesure qu'on avance dans la retenue de seuil et que les vitesses diminuent, la couche de sédiments devient de plus en plus épaisse, atteignant sa consistance maximale à proximité de T5, où l'épaisseur moyenne

est de 0,29 m. À l'aval de ce secteur, en concomitance avec la légère augmentation de la vitesse de l'écoulement, l'épaisseur de la couche de sédiments s'affaiblit et elle devient pratiquement nulle au niveau de T10, où se situe la confluence entre la retenue et le petit chenal. Entre T11 et T13, la couche de sédiments réapparaît et on peut supposer que cela est dû aux particules qui rentrent dans la retenue via le chenal cité supra, pendant les périodes de hautes eaux.

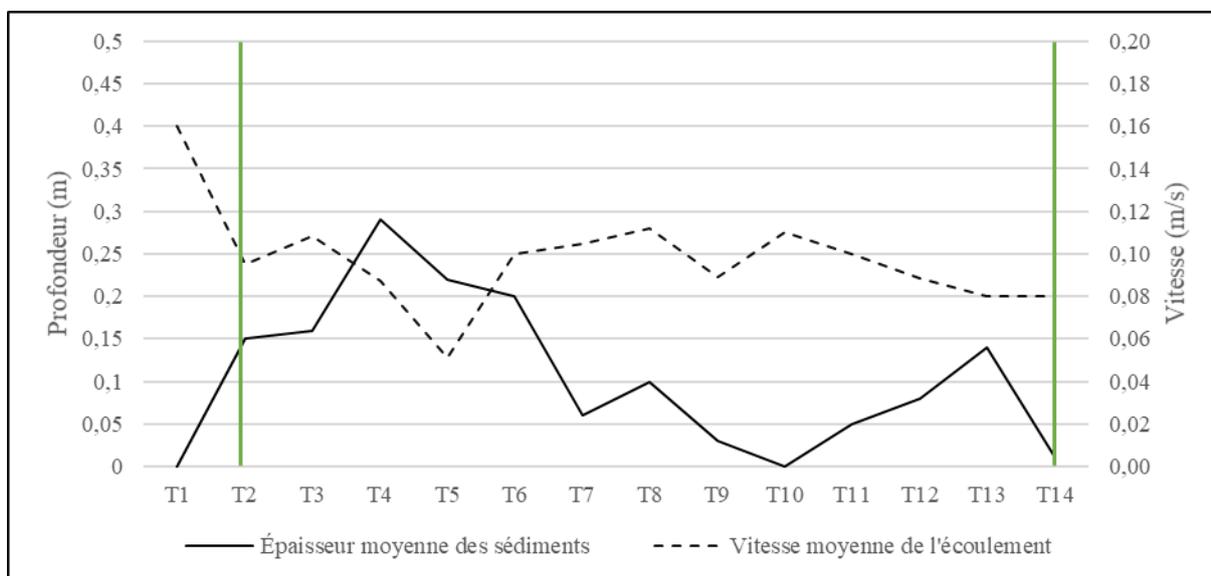


Figure 64 : L'épaisseur moyenne de la couche de sédiments qui recouvre les fonds de la retenue de seuil de Saint-Hilaire ; les traits rouges représentent les limites de la retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati).

Vers la fin de février 2020, une petite crue a grossi les Mauves et la retenue de Saint-Hilaire a été concernée par des débits particulièrement importants (fig. 65). Nous avons exploité cette circonstance pour vérifier si la couche avait évolué sous l'effet d'un écoulement plus intense, ré-appliquant la même méthodologie dans les transects T3, T4, T5 et T6, là où elle semblait plus épaisse. Globalement, elle apparaît plus mince et dans certains secteurs elle s'est réduite de moitié (tab. 8).

Tableau 8 : L'épaisseur moyen de la couche de sédiments dans la retenue de seuil de Saint-Hilaire avant et après la crue de février 2020

L'ÉPAISSEUR MOYEN DE LA COUCHE DE SÉDIMENTS (m)				
	T3	T4	T5	T6
Avant Crue	0,16	0,29	0,22	0,20
Après Crue	0,09	0,08	0,12	0,16



Figure 65 : La retenue de seuil de Saint-Hilaire sur le point de déborder pendant la crue de février 2020 (Photo réalisée par Francesco Donati).

Grâce aux carottages réalisés tout au long de la retenue de seuil de Saint-Hilaire, l'aspect de la couche de sédiments a pu être analysé. Les carottes prélevées dans T3, T4, T5 et T6, où la strate de sédiments est plus épaisse, présentent globalement trois horizons distincts : le premier, sommital, est composé de particules organiques, le second est composé d'un mélange de particules organiques et minérales et le plus profond est composé de particules minérales (fig. 66). Dans ces quatre échantillons, les filons organiques et mixtes sont plutôt minces, mesurant en moyenne 4 cm chacun, alors que les filons minéraux sont beaucoup plus importants, mesurant en moyenne 26 cm. Les carottes prélevées dans T7, T8, T9 et T10 où la strate de sédiments s'affaiblit progressivement, ne présentent pas des horizons bien distincts comme les précédentes. En effet, elles semblent être constituées par un seul filon, formé principalement par des particules minérales mélangées à des particules organiques très fines. L'aspect des carottes prélevées dans T11, T12, T13 et T14, où la couche de sédiments redevient assez épaisse, est très similaire à celui des échantillons collectés entre T3 et T6. Dans ce cas aussi, ils se composent globalement des trois horizons, un organique, un mixte et un minéral, ce dernier étant le plus important des trois (fig. 67). Les pertes au feu réalisées sur les échantillons prélevés dans les transects T1, T4, T8 et T13 ont en quelque sorte confirmé cette évolution (tab. 9).



Figure 66 : La carotte prélevée dans le transect T5. La ligne verte matérialise l'horizon organique composé de débris végétaux, celle jaune celui mixte composé de débris végétaux/minéraux et celui gris l'horizon composé de débris minéraux (Photo réalisée par Francesco Donati).



Figure 67 : La carotte prélevée dans le transect T12. La ligne verte matérialise l'horizon organique composé de débris végétaux, celle jaune celui mixte composé de débris végétaux/minéraux et celui gris l'horizon composé de débris minéraux (Photo réalisée par Francesco Donati).

Tableau 9 : Le pourcentage de matière organique dans certains échantillons prélevés dans la retenue de seuil de Saint-Hilaire.

T1	T4	T8	T10	T13
2,3	26,3	20,6	9,2	4,6

Pour ce qui concerne la partie minérale, les analyses granulométriques ont permis de mettre en évidence qu'elle se compose principalement de sables et plus précisément de sables moyens, comme on peut le voir sur la figure 68. La classe des graviers est plus importante dans les transects de la retenue de seuil où l'énergie de l'écoulement est plus forte (les transects en amont de la retenue de seuil et ceux immédiatement à l'aval de la confluence avec le chenal qui se jette dans sa partie aval) et presque inexistante dans les transects où l'énergie de l'écoulement est plus faible. Globalement, les classes granulométriques des limons et des argiles ne sont pas très représentées : cette observation confirme les évaluations faites plus haut à propos de la compétence de l'écoulement dans la retenue de seuil.

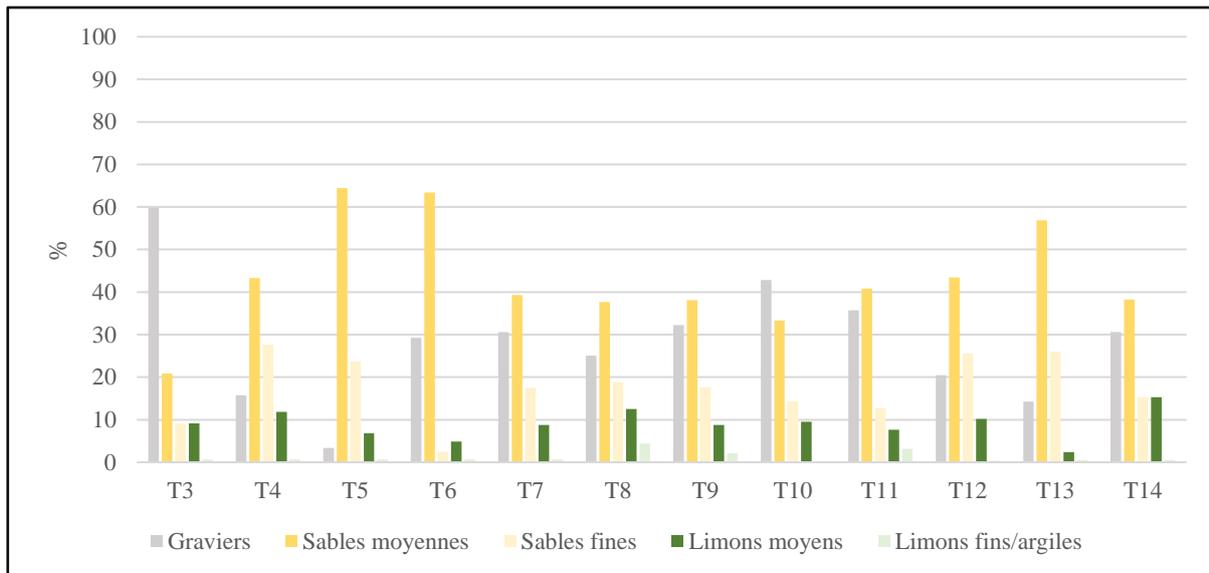


Figure 68 : La granulométrie des échantillons collectés dans la retenue de seuil de Saint-Hilaire (Réalisation : Francesco Donati).

Pour résumer, les résultats de l'étude sédimentaire effectuée à l'amont du petit seuil en rivière de Saint-Hilaire montrent que, dans ce type de retenue de seuil, a lieu un léger changement de la compétence du tributaire qui l'alimente. Probablement à cause de ce phénomène, sur ses fonds se forme une strate de sédiments, dont l'épaisseur évolue sous l'effet des crues, comme le démontrent les données collectées en février 2020. Les sédiments qui composent cette couche sont principalement des particules minérales, bien que dans sa partie sommitale on y retrouve des matières organiques en des quantités parfois importantes. La granulométrie des sédiments suit l'évolution de la vitesse de l'écoulement, car les particules plus grandes se situent là où les eaux sont plus turbulentes, alors que celles qui ont un plus faible diamètre sont présentes là où les eaux ont une faible énergie.

Pour conclure, le fonctionnement abiotique d'une retenue de seuil formée par un ouvrage de faible hauteur serait donc caractérisé par des très légères variations de température au sein de la colonne d'eau, notamment pendant l'été, des courants unidirectionnels à faible énergie et un faible changement de compétence du tributaire.

3.2 Les résultats obtenus à l'amont de la retenue de seuil de Baerenthal, archétype d'une retenue de seuil formée par un ouvrage de taille moyenne (1 m)

Dans la retenue de seuil de Baerenthal, l'analyse des caractéristiques abiotiques a démarré en février 2018 et elle s'est conclue en mai 2020. Durant cette période ont été collectées 75121 températures horaires de l'eau (auxquelles il faut ajouter les 18576 données thermiques collectées dans l'étang de Baerenthal), effectuées cinq campagnes de mesures

hydrodynamiques et trois de mesures bathymétriques-sédimentaires. La chaîne de thermomètres qui a collecté les données thermiques dans ce terrain d'étude est restée en place pendant toute la période indiquée *supra*, mais un arrêt soudain du thermomètre situé à 0,7 m de profondeur a provoqué la perte des données qui vont de février à mai 2020 : pour cette raison, nous présenterons les résultats relatifs à la période précédant ce dysfonctionnement. Les caractéristiques hydrodynamiques ont été examinées au moins une fois par saison, jusqu'à la première panne qui a concerné le FlowTracker 2. Les caractéristiques bathymétriques-sédimentaires ont été analysées sans rencontrer de difficultés.

3.2.1 Les résultats de l'étude thermique

Les données collectées par la chaîne de thermomètres n'ont pas relevé l'existence de gradients thermiques verticaux remarquables entre la surface et le fond de la colonne d'eau de la retenue de seuil de Baerenthal. En effet, pendant quasiment toute la période d'étude, ce paramètre n'a montré que des valeurs nulles, à l'exception de courts moments qui ont eu lieu notamment pendant les saisons estivales (tab. 10 et fig. 69).

Tableau 10 : Le gradient thermique verticale moyen, maximale positif et maximale négatif entre la surface et le fond de la colonne d'eau de la retenue de seuil de Baerenthal au cours des saisons.

	GRAD. MOYEN	GRAD. MAX. POSITIVE	GRAD. MAX. NÉGATIF
Hiver 2018	0,0	0,0	0,0
Printemps 2018	0,0	0,6	0,0
Été 2018	0,0	1,4	-0,6
Automne 2018	0,0	0,3	-0,4
Hiver 2019	0,0	0,3	-0,3
Printemps 2019	0,0	1,0	-0,3
Été 2019	0,0	1,0	-0,4
Automne 2019	0,0	0,3	-0,4
Hiver 2020	0,0	0,0	-0,3

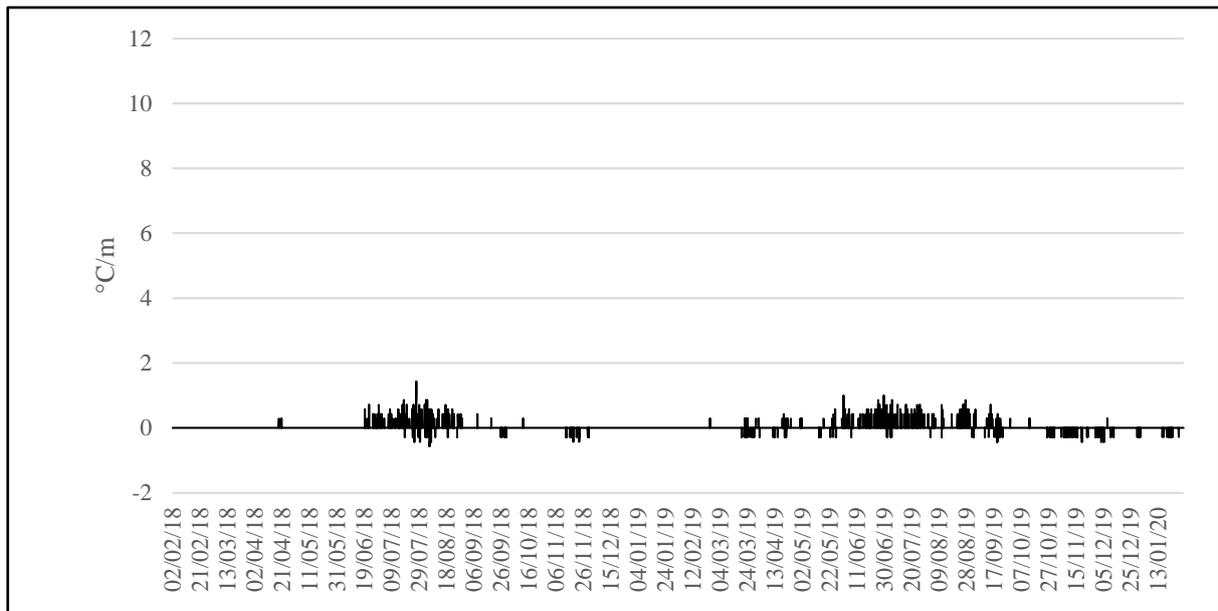


Figure 69 : Le gradient thermique entre la surface et le fond de la retenue de seuil de Baerenthal pendant toute la période d'étude (Réalisation : Francesco Donati).

Ces chiffres s'expliquent en examinant le Δ° , qui montre que, pendant la majeure partie de la période d'étude, la colonne d'eau a été thermiquement homogène, sauf pendant de rares occasions où de faibles différences de température entre la surface et le fond se sont mises en place (tab. 11 et fig. 70). Entre le 02/02/2018 et le 31/12/2018, le Δ° moyen a été de 0,0 °C : les moments caractérisés par un $\Delta^\circ \neq 0$ (résultent le) représentent 0,0 % de l'hiver, 0,2 % du printemps, 6,8 % de l'été et 2,2 % de l'automne. Ils ont eu lieu principalement en début d'après-midi ou au cours de la nuit (entre 12:00 et 14:00 ou 22:00 et 05:00) et leur durée moyenne a été de trois heures. Durant les mois printaniers, le Δ° le plus important qui a été observé est de 0,4 °C, pendant les mois estivaux de 1 °C et pendant ceux d'automne de 0,2 °C. La journée marquée par le plus grand nombre d'heures de $\Delta^\circ \neq 0$ a été celle du 06/08/2018, au cours de laquelle a été observée une différence thermique entre la surface et le fond de la colonne d'eau durant 12 heures (Δ° maximal = 0,3 °C), dont 7 consécutives. Ces dernières concernent les premières heures de la journée (entre 00:00 et 7:00) et elles sont caractérisées par un Δ° négatif (Δ° minimal = -0,4 °C), ce qui signifie que les eaux en profondeur étaient plus chaudes que celles en surface. Entre le 01/01/2019 et le 01/02/2020, le Δ° moyen a été de 0,0 °C : les moments caractérisés par un $\Delta^\circ \neq 0$ représentent 0,1 % de l'hiver, 3,4 % du printemps, 7,1 % de l'été et 6,1 % de l'automne. Ils se sont vérifiés principalement en début d'après-midi ou au cours de la nuit (entre 12:00 et 13:00 ou 22:00 et 05:00) et leur durée moyenne a été de trois heures sauf en été où cette valeur a atteint les quatre heures. Durant les mois hivernaux, le Δ° le plus fort qui a été observé est de 0,2 °C, il est de 0,7 °C pendant les mois printaniers et estivaux et de 0,6

°C pendant ceux d'automne. La journée marquée par le plus grand nombre d'heures de $\Delta^\circ \neq 0$ a été celle du 04/12/2019, au cours de laquelle a été observée une différence thermique entre la surface et le fond de la colonne d'eau de 13 heures, dont 8 consécutives. Dans ce cas aussi, il s'agit de moments caractérisés par des Δ° négatifs (Δ° minimaux = -0,2 °C), qui ont eu lieu au cours de la nuit et du soir.

Tableau 11 : Le Δ° moyen, minimale et maximale entre la surface et le fond de la colonne d'eau de la retenue de seuil de Baerenthal au cours des saisons.

	Δ° MOY.	Δ° MAX.	Δ° MIN.
Hiver 2018	0,0	0,0	0,0
Printemps 2018	0,0	0,4	0,0
Été 2018	0,0	1,0	0,0
Automne 2018	0,0	0,2	0,0
Hiver 2019	0,0	0,2	0,0
Printemps 2019	0,0	0,7	0,0
Été 2019	0,0	0,7	0,0
Automne 2019	0,0	0,2	0,0
Hiver 2020	0,0	0,0	-0,2

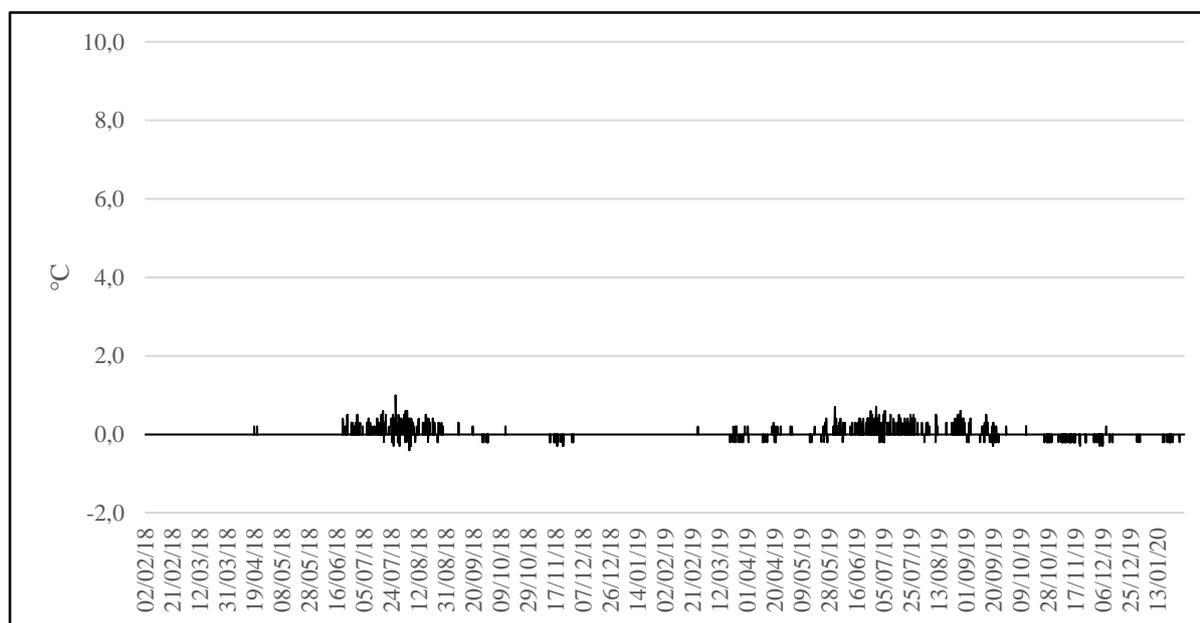


Figure 70 : Le Δ° entre la surface et le fond de la colonne d'eau de la retenue de seuil de Baerenthal au cours de toute la période d'étude.

La quasi totale uniformité thermique de la colonne d'eau au cours de la période d'étude et l'absence de strates d'eau distinctes en son sein sont confirmées par une analyse plus détaillée de l'évolution de la température aux différentes profondeurs. En effet, pendant toute la période

d'étude, les cycles thermiques journaliers sont identiques dans les divers niveaux de la colonne d'eau, comme on peut l'observer en calculant l'amplitude thermique journalière (tab. 12).

Tableau 12 : L'amplitude thermique moyenne (en °C) aux différents niveaux de la colonne d'eau dans la retenue de seuil de Baerenthal.

	0,1 m	0,4 m	0,7 m
Hiver 2018	1,3	1,3	1,3
Printemps 2018	2,1	2,1	2,1
Été 2018	2,2	2,2	2,2
Automne 2018	1,0	0,9	0,9
Hiver 2019	1,2	1,2	1,2
Printemps 2019	2,2	2,2	2,2
Été 2019	2,2	2,1	2,1
Automne 2019	0,8	0,8	0,8
Hiver 2020	1,0	1,0	1,0

Les légères hétérogénéités thermiques qui se forment dans la colonne d'eau semblent être engendrées par une plus forte sensibilité des eaux superficielles aux variations de la température atmosphérique, le jour comme la nuit. Pendant le jour, elle se réchauffent suivant le réchauffage de la température de l'air et pendant la nuit elles se refroidissent grâce au à cause du refroidissement convectif qui leur fait perdre des calories. Le cas suivant montre concrètement les vicissitudes thermiques qui se produisent au sein de la retenue de Baerenthal. Il concerne la journée du 27/07/2018 et il est représentatif de l'effet du refroidissement nocturne et de du réchauffement matinal de l'air sur la température de l'eau (fig. 71) :

- Entre 0:00 et 5:00, la température de l'air se refroidit, passant de 24,9 °C à 22,4 °C. À cela correspond une diminution de la température de l'eau à toutes les profondeurs, mais avec les eaux superficielles qui se refroidissent davantage que celles en profondeur.
- À partir de 6:00, la température de l'air commence à augmenter, atteignant les 31,5 °C à 10:00. Pendant ce laps de temps, la température de l'eau suit d'abord la tendance décrite dans le point précédent, mais à partir de 7:00 elle s'inverse, avec les eaux en surface qui se réchauffent davantage que celles en profondeur.
- Entre 10:00 et 16:00, la température de l'air continue d'augmenter atteignant la valeur maximale de 32,3 °C. L'eau en surface continue à se réchauffer plus que celle en profondeur, l'eau au milieu de la colonne d'eau étant légèrement plus chaude que celle sur le fond.

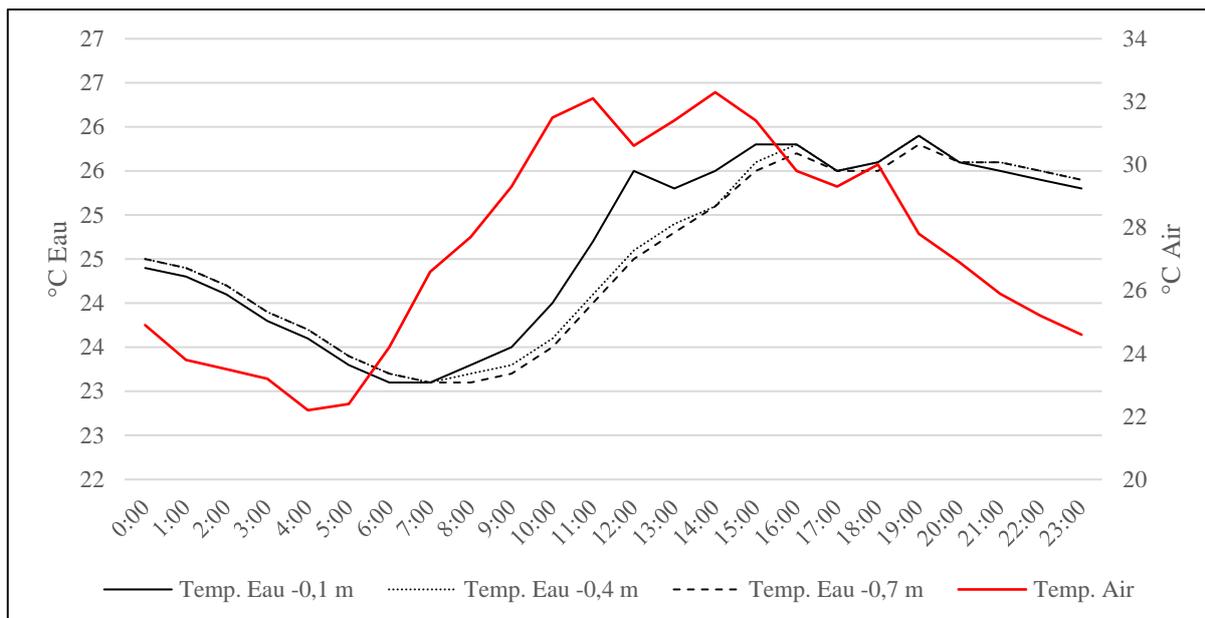


Figure 71 : L'évolution de la température de l'eau et de l'air dans la retenue de seuil de Baerenthal le 27/07/2018 (Réalisation : Francesco Donati).

Totalement différent est le fonctionnement thermique observé dans l'étang de Baerenthal, entre le 02/02/2018 et le 17/10/2018, où la chaîne de thermomètres positionnée dans ce plan d'eau a mis en évidence des gradients thermiques verticaux évidents entre la surface et le fond de la colonne d'eau (tab. 13 et fig. 72). Leur intensité varie en fonction des saisons, avec l'été qui est caractérisé par les valeurs les plus fortes et l'hiver par les plus faibles. Au cours des moments les plus froids de l'année, on observe également des gradients thermiques négatifs bien développés, avec la température de l'eau qui augmente de la surface vers le fond.

Tableau 13 : Le gradient thermique verticale moyen, maximale positif et maximale négatif entre la surface et le fond de la colonne d'eau de l'étang de Baerenthal au cours des saisons.

	GRAD. MOY.	GRAD. MAX. POSITIF	GRAD. MAX. NÉGATIF
Hiver 2018	-0,1	1,9	-3,1
Printemps 2018	0,8	7,1	-2,0
Été 2018	2,1	10,6	0,0
Automne 2018	0,8	5,4	0,0

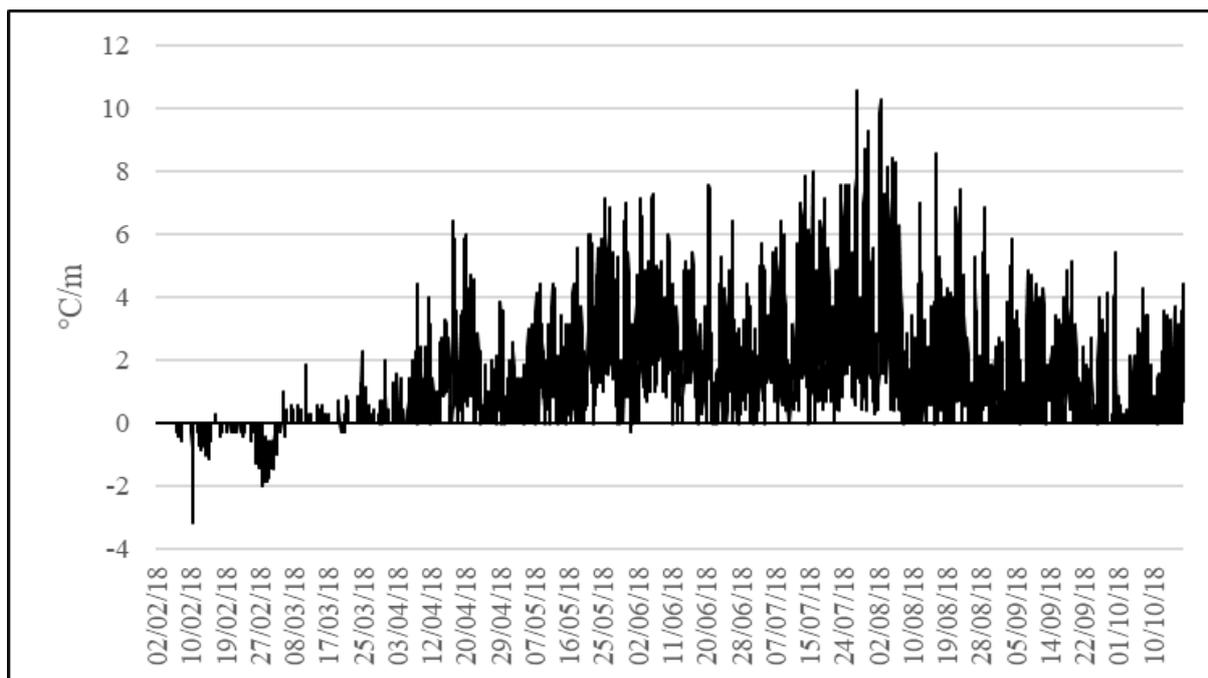


Figure 72 : Le gradient thermique entre la surface et le fond de l'étang de Baerenthal entre le 02/02/2018 et le 17/10/2018 (Réalisation : Francesco Donati).

Ces chiffres s'expliquent en analysant le Δ° , qui montre comment la colonne d'eau a été concernée par des stratifications thermiques directes et inverses (tab. 14 et fig. 73). Le Δ° moyen entre la surface et le milieu de la colonne d'eau a été de 0,4 °C et, entre la surface et le fond, de 0,9 °C : dans ce dernier cas, les moments caractérisés par un $\Delta^\circ \neq 0$ représentent 24 % de l'hiver, 72,4 % du printemps, 88 % de l'été et 56,9 % de l'automne. Contrairement à la retenue de seuil, il n'y a pas une tranche horaire particulière au cours de laquelle ces différences thermiques sont présentes, car elles se développent tout au long de la journée. Durant les mois hivernaux, le Δ° le plus fort qui a été observé est de -2,2 °C, pendant les mois printaniers de 5 °C, pendant ceux d'été de 7,4 °C et pendant ceux d'automne de 3,8 °C. Au cours de toutes les saisons, plusieurs cycles de 24 heures de différences thermiques ont été observés, dont le plus long a duré du 24/07/2018 au 07/08/2018.

Tableau 14 : Le Δ° moyen, minimale et maximale entre la surface et le fond de la colonne d'eau de l'étang de Baerenthal au cours des saisons.

	Δ° MOY.	Δ° MAX.	Δ° MIN.
Hiver 2018	-0,1	1,3	-2,2
Printemps 2018	1,0	5,0	-1,4
Été 2018	1,5	7,4	0,0
Automne 2018	0,6	3,8	0,0

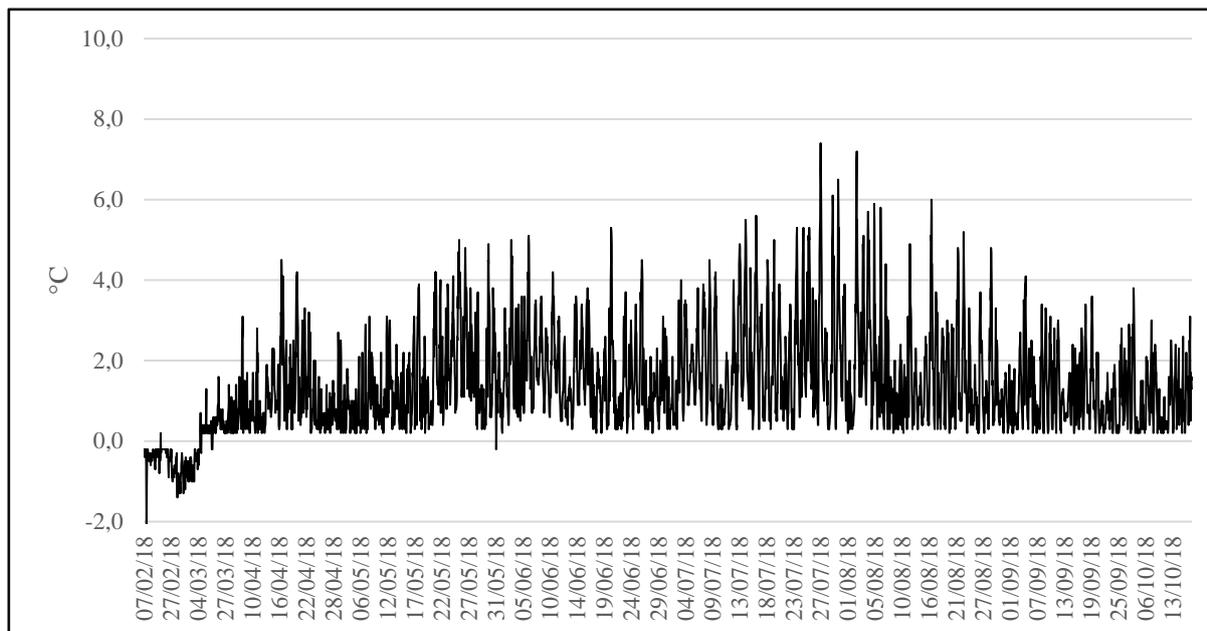


Figure 73 : Le Δ° entre la surface et le fond de la colonne d'eau de de l'étang de Baerenthal entre 02/02/2018 et le 17/10/2018 (Réalisation : Francesco Donati).

La présence de strates d'eau distinctes au sein de la colonne d'eau est confirmée par une analyse plus détaillée de l'évolution de la température aux différentes profondeurs et le calcul des amplitudes thermiques journalières. En effet, les valeurs de ce paramètre sont différentes dans les divers niveaux de la colonne d'eau, différence qui apparaît particulièrement évidente pendant les mois estivaux quand l'hétérogénéité de la colonne d'eau est la plus forte (tab.15).

Tableau 15 : L'amplitude thermique moyenne (en °C) aux différents niveaux de la colonne d'eau de l'étang de Baerenthal.

	-0,10 m	-0,40 m	-0,7m
Hiver 2018	1,3	1,2	1,1
Printemps 2018	3,3	3,0	3,0
Été 2018	3,7	2,9	2,8
Automne 2018	2,7	2,2	2,1

Pour résumer, les résultats de l'étude thermique effectuée à l'amont du seuil en rivière de taille moyenne de Baerenthal montrent que la colonne d'eau de ce type de retenue de seuil semblerait rester quasi parfaitement homogène tout au long des saisons d'une année, à l'exception de l'été, quand des très légères variations de température entre la surface et le fond se forment au milieu de la journée. La durée et l'intensité de ces moments sont très faibles, car ils durent uniquement pendant quelques heures et ils ne dépassent jamais 1 °C de différence entre les différents niveaux de la colonne d'eau. Ce fonctionnement thermique n'est pas du tout

comparable avec celui de l'étang voisin, où des stratifications thermiques beaucoup longues et beaucoup intenses ont été observées tout au long de l'année d'observation. Mais qu'en est-il du fonctionnement hydrodynamique de ce type de retenue de seuil ?

3.2.2 *Les résultats de l'étude hydrodynamique*

L'étude de la direction des flux d'eau n'a pas démontré l'existence de courants pluridirectionnels au sein de la retenue de seuil de Baerenthal, mais au contraire elle a mis en évidence la présence d'un écoulement qui la traverse longitudinalement, dans la direction amont-aval (fig. 74 et tab. 16). En effet, à l'intérieur du périmètre de la retenue de seuil, l'ouverture des angles des vitesses a été toujours comprise entre 0° et $\pm 90^\circ$, l'angle de vitesse moyen a été de $4,2^\circ$ et des angles présentant une ouverture comprise entre $\pm 90^\circ$ et $\pm 180^\circ$ n'ont jamais été observés. La conformation de ce terrain d'étude permet de comparer les valeurs observées dans les transects situés à l'intérieur de la retenue de seuil avec celles mesurées dans les transects placés en amont de celle-ci, donc dans une zone qui devrait présenter des traits fluviaux. Dans ce secteur aussi, les angles des vitesses mesurées ont été toujours compris entre 0° et $\pm 90^\circ$, l'angle de vitesse moyen a été de $-1,8^\circ$ et des angles présentant une ouverture comprise entre $\pm 90^\circ$ et $\pm 180^\circ$ n'ont jamais été observés. Dans la retenue de seuil et dans le secteur qui la précède, des variations temporelles évidentes de ce paramètre n'ont pas été relevées, celui-ci se montrant à peu près constant tout au long de l'étude.

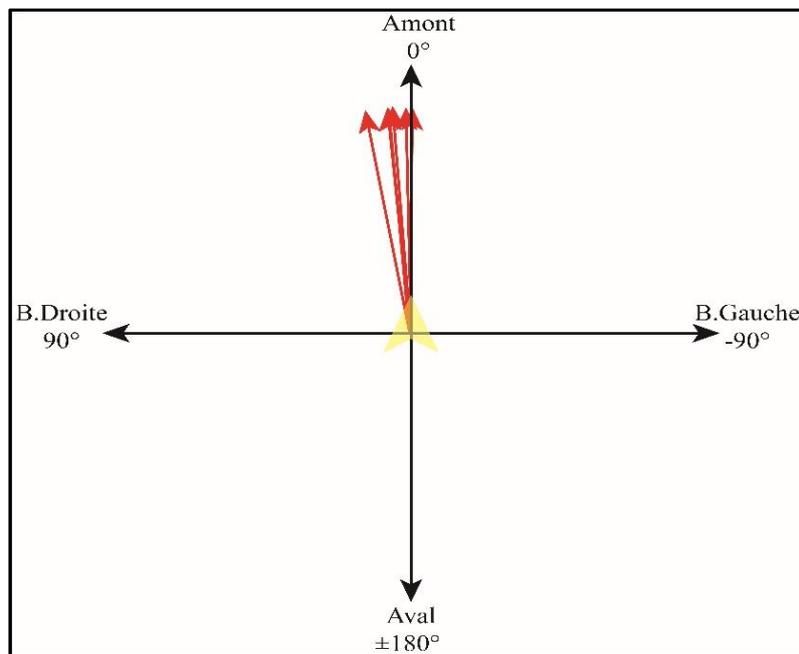


Figure 74 : Les vecteurs qui matérialisent la direction de l'écoulement dans les différents transects à l'intérieur de la retenue de seuil de Baerenthal, dessinés à partir des angles des vitesses moyens mesurés (Réalisation : Francesco Donati).

Tableau 16 : L'angle de vitesse moyen dans tous les transects qui subdivisent le terrain d'étude de Baerenthal.

L'ANGLE DE VITESSE MOYEN EN °													
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
-9,0	1,4	11,6	-1,8	-3,9	2,4	-4,3	-5,1	-0,6	1,1	9,7	5,0	4,5	3,9

À l'intérieur de la retenue de seuil, le nombre de Froude présente des valeurs inférieures à 0,15, similaires à celles qu'on observe dans les mouilles des cours d'eau (fig. 75). La valeur moyenne de Fr est de 0,03 et elle est globalement uniforme dans toute la retenue de seuil, variant très peu d'un transect à l'autre. Dans le secteur qui la précède, Fr a toujours été aussi inférieur à 0,15, mais il présente des valeurs légèrement plus élevées, qui en moyenne sont de 0,07. Dans ce cas aussi, d'évidentes variations saisonnières de ce paramètre n'ont pas été observées.

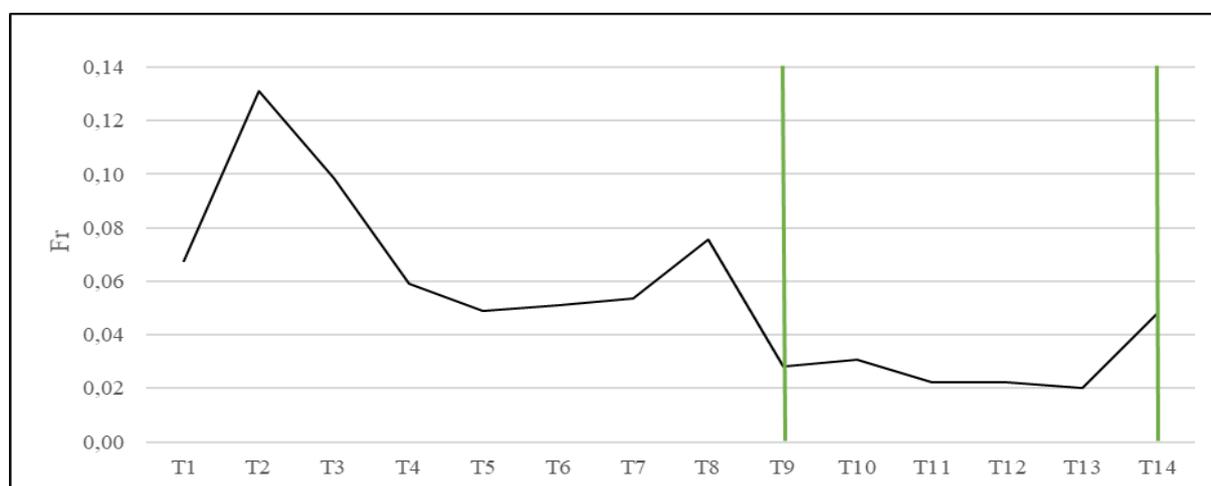


Figure 75 : Le nombre de Froude moyen dans tous les transects qui subdivisent le terrain d'étude de Baerenthal ; les traits rouges représentent les limites de la retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati).

Les jaugeages effectués au cours des différentes campagnes de mesure ont permis de mesurer un débit moyen qui alimente la retenue de seuil de $0,479 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette donnée et celle relative au volume de la retenue de seuil (qui on le rappelle est de 1352 m^3) ont permis de calculer un temps de séjour des eaux moyen de 0,7 heure.

Pour résumer, les résultats de l'étude hydrodynamique effectué à l'amont du seuil en rivière de taille moyenne de Baerenthal sembleraient montrer que dans ce type de retenue de seuil l'écoulement se déplace uniquement dans la direction amont-aval, des courants pluridirectionnels n'ayant jamais été observés tout au long de la période d'étude. Ces flux d'eau sont caractérisés par une faible énergie, comme le montrent les valeurs moyennes de Fr , qui ne dépassent jamais les 0,05. Les temps de séjour des eaux sont globalement très courts, ne

dépassant pas l'échelle horaire. Mais qu'en est-il du fonctionnement sédimentaire de ce type de retenue de seuil ?

3.2.3 *Les résultats de l'étude sédimentaire*

À l'intérieur de la retenue de seuil, la vitesse moyenne de l'écoulement est de 0,07 m/s et elle reste quasiment constante dans tout son périmètre, présentant des valeurs comprises entre 0,06 et 0,08 m/s. Au contraire, en dehors de la retenue de seuil, la vitesse moyenne est de 0,15 m/s et elle est particulièrement rapide au niveau de la confluence qui alimente ce terrain d'étude. Quand on les croise avec le diagramme de Hjulström, ces chiffres permettent d'avoir un aperçu sur la compétence de l'écoulement dans ce secteur de la Zinsel du Nord (fig. 76). Si on se réfère à la vitesse moyenne de l'écoulement à l'intérieur de la retenue de seuil, on remarque que les eaux n'ont pas la force suffisante pour éroder les sédiments, mais uniquement pour les transporter. Cela concerne toutes les particules dont la taille est inférieure à 1 mm, valeur qui dans l'échelle granulométrique de Wentworth correspond aux sables grossiers. Si on se réfère à la vitesse moyenne de l'écoulement dans les transects situés à l'amont de la retenue de seuil, on remarque que, ici aussi, les eaux n'ont pas la force suffisante pour éroder les particules, mais uniquement celle pour les transporter. Cela concerne tous les sédiments dont la taille est inférieure à 2-3 mm, ce qui, dans l'échelle granulométrique de Wentworth, correspond aux graviers fins.

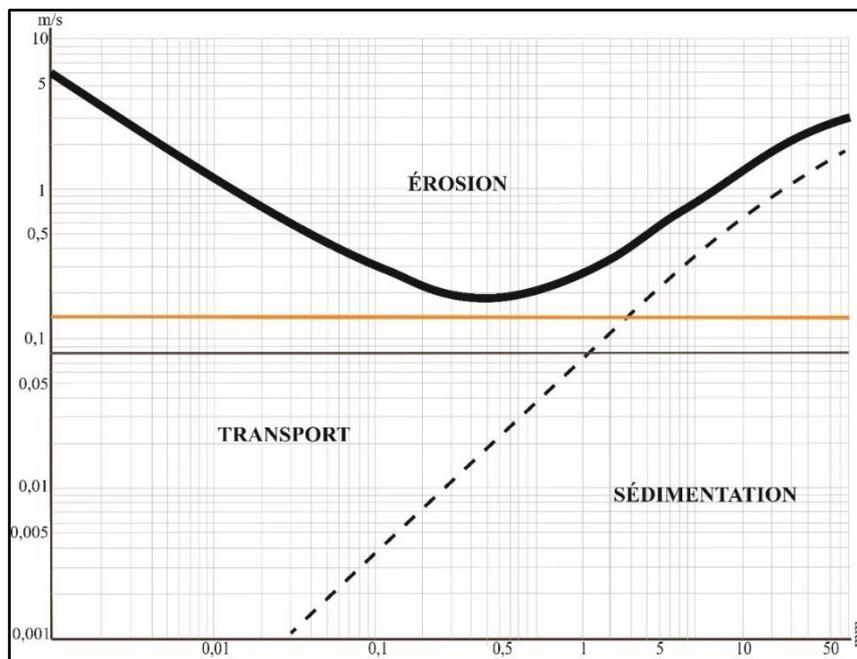


Figure 76 : La compétence de l'écoulement dans le site de Baerenthal, selon le diagramme de Hjulström. En marron la vitesse moyenne dans la retenue de seuil ; en rouge celle dans les transects à son amont (Réalisation : Francesco Donati).

Les données bathymétriques collectées dans ce terrain d'étude montrent l'existence d'une strate de sédiments qui recouvre les fonds en dehors et dans le périmètre de la retenue de seuil (fig. 77). Dans le premier cas, on observe que, au niveau du transect T1, la couche est totalement absente, elle apparaît soudainement entre les transects T2 et T5 et elle disparaît entre les transects T6 et T7. Sa position coïncide avec l'ancien cratère de bombe entretenu dans l'après-guerre pour préserver un spot de pêche particulièrement prisé : nous supposons que la présence de cette couche de particules est attribuable aux vicissitudes historiques qui ont intéressé ce secteur. Au contraire, la strate de sédiments qu'on observe à partir des transects T8 et T9 est très probablement générée par le seuil en rivière, commençant à se former exactement au niveau du ralentissement engendré par l'ouvrage hydraulique. À proximité de T11, les sédiments atteignent leur épaisseur maximale de 50 cm et au fur et à mesure qu'on se rapproche du seuil en rivière elle s'amincit, devenant presque inexistante au niveau du transect T14.

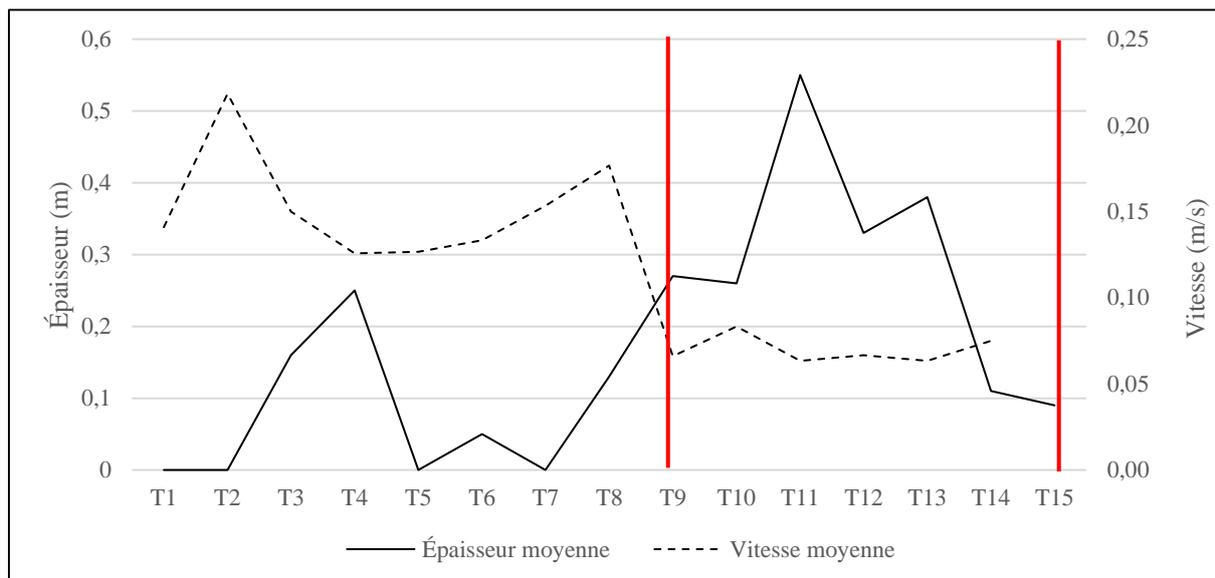


Figure 77 : L'épaisseur moyenne de la couche de sédiments qui recouvre les fonds de la retenue de seuil de Baerenthal, les traits rouges représentent les limites de la retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati).

Les carottages réalisés dans le périmètre de la retenue de seuil ont permis d'observer l'aspect de cette couche de sédiments qui recouvre le fond. Au total, quatre carottes ont été prélevées au niveau des transects T9, T10, T11 et T12. Dans chacune d'entre elles, on distingue clairement deux horizons (fig. 78) : un en surface composé principalement par des particules organiques (débris végétaux assez grossiers) mélangées à des particules minérales et un en profondeur composé presque exclusivement de particules minérales. Dans ces quatre échantillons, le premier filon est toujours les moins épais, mesurant en moyenne 3,5 cm, alors que le deuxième est toujours le plus épais, mesurant en moyenne 10 cm.



Figure 78 : La carotte prélevée dans le transect T10. La ligne verte matérialise l'horizon principalement organique et celle grise celui minéraux (Photo réalisée par Francesco Donati).

Pour ce qui concerne la partie minérale, les analyses granulométriques ont permis de mettre en évidence qu'elle se compose principalement de sables et plus précisément de sables moyens et fins, comme on peut le voir sur la figure 79. Au contraire, les classes des graviers, des limons et des argiles ne sont pas très représentées voire totalement absentes, conformément aux résultats illustrés plus haut, relatifs à la compétence de l'écoulement dans la retenue de seuil.

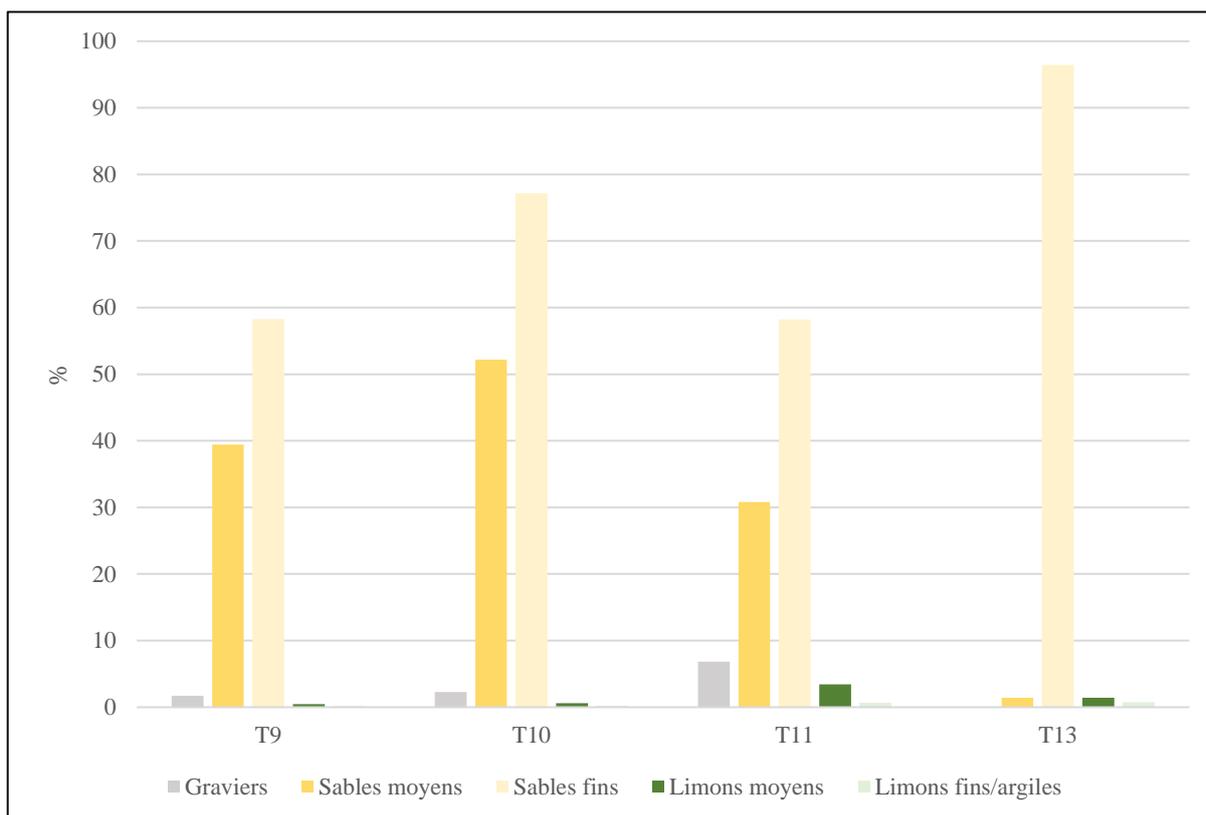


Figure 79 : La granulométrie des échantillons collectés dans la retenue de seuil de Baerenthal (Réalisation : Francesco Donati).

Pour resumer, les résultats de l'étude sédimentaire effectuée à l'amont du seuil de taille moyenne de Baerenthal montrent que à l'intérieur de cette retenue de seuil se produit un petit changement de la compétence du tributaire qui l'alimente. Ici aussi, probablement à cause de ce phénomène, les fonds sont recouverts par une strate de sédiments, qui dans certains endroits

devient particulièrement épaisse. Les particules qui la composent sont quasi exclusivement minérales, bien que dans sa partie sommitale on y retrouve des matières organiques. La granulométrie des sédiments semblerait suivre l'évolution de la vitesse de l'écoulement, car celles qui ont un grand diamètre se situent là où les eaux ont une forte énergie, alors que celles qui ont un faible diamètre se situent là où les eaux sont plus calmes.

Pour conclure, le fonctionnement abiotique d'une retenue de seuil formée par un ouvrage de hauteur moyenne semble être très similaire à celui de son homologue de Saint-Hilaire symbolisant les ouvrages de petite taille. En effet, ici aussi de très légères variations estivales de température au sein de la colonne d'eau, de courants unidirectionnels à faible énergie et un faible changement de compétence du tributaire ont été observés. Au moins sur le plan thermique, l'étude comparative avec l'étang de Baerenthal montre que la retenue de seuil de Baerenthal fonctionne de manière très différente et que les retenues de seuil de petite dimension ne peuvent être comparées à des étangs. Mais cette assertion scientifique est-elle encore valable dès lors que l'on augmente considérablement la hauteur du seuil et le volume d'eau contenue dans la retenue ?

3.3 Les résultats obtenus dans la retenue de seuil de Thévalles, formée par un seuil de 2 m de hauteur

Dans la retenue de seuil de Thévalles, l'étude des caractéristiques abiotiques a démarré en décembre 2018 et s'est conclue en novembre 2020. Pendant cette période ont été collectées plus de 63000 températures horaires de l'eau, effectuées trois campagnes de mesure du débit et trois de mesures bathymétriques-sédimentaires. Comme on l'a expliqué plus haut, l'intérêt de ce terrain d'étude réside dans le fait qu'il permet d'analyser la température de l'eau dans des conditions très similaires à celles d'un étang et de collecter en même temps des données dans un endroit où la ripisylve est totalement absente et dans un autre où elle est dense. Ainsi, à partir du 01/12/2020, une première chaîne de thermomètres a été positionnée dans la partie aval de la retenue de seuil dans la zone ensoleillée et, à partir du 16/10/2019, une deuxième chaîne de thermomètres a été ajoutée plus en amont dans le secteur ombragé. Toutefois, à la fin de l'année 2019, une crue a ravagé ce terrain d'étude, provoquant la perte de tous les thermomètres fixés à la chaîne située en aval, nous obligeant à de périlleuses opérations de récupération de ce dispositif, coincé dans les annexes hydrauliques de l'ancien moulin (fig. 80). Au début de l'année 2020, une deuxième et plus puissante crue a intéressé à nouveau l'Erve, emportant cette fois-ci les deux chaînes de thermomètres et provoquant la perte d'une partie des sondes. Pour

ne pas risquer de perdre encore d'autres instruments, nous avons décidé de déséquiper ce terrain d'étude pendant la saison froide et durant le temps nécessaire pour récupérer de nouveaux thermomètres enregistreurs. Toutefois, la remise en eau rapide des chaînes de thermomètres a été rendue impossible par les interdictions de déplacements engendrés par l'épidémie de COVID19 : c'est pourquoi elles n'ont été remises en place que le 06/06/2020. À cet inconvénient s'ajoute l'arrêt soudain du thermomètre fixé à 0,5 m de profondeur dans la chaîne la plus en amont, qui a engendré la perte d'une partie des données collectées à ce niveau de la colonne d'eau à partir de juin 2020. Au cours de l'hiver 2021, une nouvelle crue a engendré encore la perte de quelques sondes que nous avons repositionnées dans le bief, ce qui nous a poussé à arrêter toute opération d'échantillonnage dans ce terrain d'étude.



Figure 80 : À gauche : la crue qui a touché le terrain d'étude de Thévalles en décembre 2019. À droite : une des chaînes des thermomètres coincées dans les vannes ouvrières du moulin de Thévalles (Photos réalisées par P-H. de Vitton).

3.3.1 Les résultats de l'étude thermique

Dans la section aval de la retenue de seuil de Thévalles, les données collectées par la chaîne de thermomètres ont relevé l'existence d'un léger gradient thermique vertical entre la surface et le fond de la colonne d'eau, particulièrement remarquable au cours des périodes les plus chaudes de l'année (tab. 17 et fig. 81). En effet, le gradient apparaît nul ou très faible au cours des mois hivernaux, il s'accroît au cours des mois printaniers-estivaux et il s'affaiblit à partir des mois automnaux. Au cours de l'été et de l'automne, en certaines occasions, il a perduré pendant plusieurs jours d'affilée et, toujours au cours de ces deux saisons, de légers gradients thermiques verticaux négatifs ont été également observés.

Tableau 17 : Le gradient thermique verticale moyen, maximale positif et maximale négatif (en °C) entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'aval de la retenue de seuil de Théalles au cours des saisons.

	GRAD. MOY.	GRAD. MAX. POSITIF	GRAD. MIN. NÉGATIF
Hiver 2019	0,0	0,5	0,0
Printemps 2019	0,4	3,1	0,0
Été 2019	0,7	4,5	-0,3
Automne 2019	0,1	2,4	-0,3
Hiver 2020	/	/	/
Printemps 2020	/	/	/
Été 2020	0,8	3,3	0,0
Automne 2020	0,2	1,3	0,0

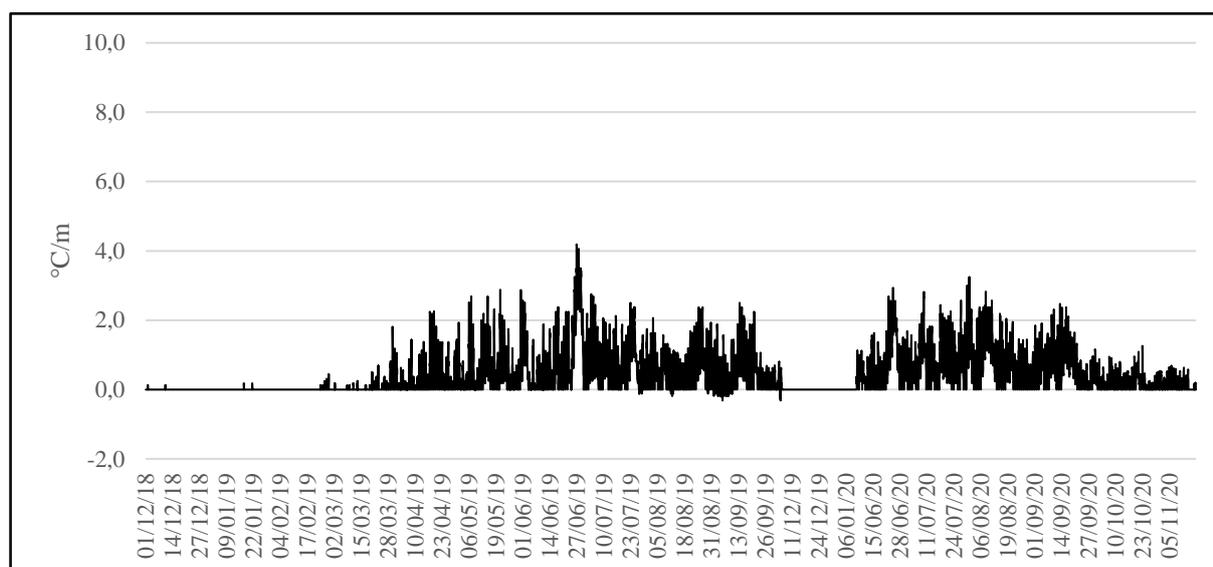


Figure 81 : Le gradient thermique entre la surface et le fond à l'aval de la retenue de seuil de Théalles pendant toute la période d'étude (Réalisation : Francesco Donati).

Ces chiffres s'expliquent en analysant le Δ° , qui montre comment, pendant certaines périodes de l'étude, la colonne d'eau a été intéressée par des stratifications thermiques (tab. 18 et fig. 82). Entre le 01/12/2018 et le 05/10/2019, le Δ° moyen entre la surface et -0,25 m a été de 0,1 °C, celui entre la surface et -0,5 m de 0,3 °C et celui entre la surface et -1,5 m de 0,5 °C : dans ce dernier cas, les moments caractérisés par un $\Delta^\circ \neq 0$ représentent 1,3 % de l'hiver, 50,7 % du printemps, 76 % de l'été et 30,1 % de l'automne. Ils ont eu lieu notamment au cours de la deuxième partie de la journée, leur durée moyenne a été de 14 heures et 22 cycles de 24 heures ont été observés, dont 19 consécutifs. Durant les mois hivernaux, le Δ° le plus fort qui a été observé entre la surface et le fond a été de 0,8 °C (le 20/03/2019), pendant les mois printaniers de 4,6 °C, pendant ceux d'été de 6,7 °C et pendant ceux d'automne 3,6 °C. Entre le 06/06/2020 et le 18/11/2020, le Δ° moyen entre la surface et -0,25 m a été de 0,5 °C, celui entre la surface et -0,5 m de 0,6 °C et celui entre la surface et -1,5 m de 1,2 °C : dans ce dernier cas, les moments caractérisés par un $\Delta^\circ \neq 0$ représentent 88 % de l'été et 54 % de la période

automnale qui a été échantillonnée. Ils ont eu lieu notamment au cours de la deuxième partie de la journée, leur durée moyenne a été de 18 heures et 38 cycles de 24 heures ont été observés, dont 31 consécutifs. Durant les mois estivaux le Δ° le plus fort qui a été observé entre la surface et le fond a été de 5,2 °C.

Tableau 18 : Le Δ° moyen, minimale et maximale (en °C) entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'aval de la retenue de seuil de Thévalles au cours des saisons.

	Δ° MOY.	Δ° MAX.	Δ° MIN.
Hiver 2019	0,0	0,8	0,0
Printemps 2019	0,6	4,6	0,0
Été 2019	1,1	6,7	-0,5
Automne 2019	0,2	3,6	-0,5
Hiver 2020	/	/	/
Printemps 2020	/	/	/
Été 2020	1,3	5,2	0,0
Automne 2020	0,3	2,1	0,0

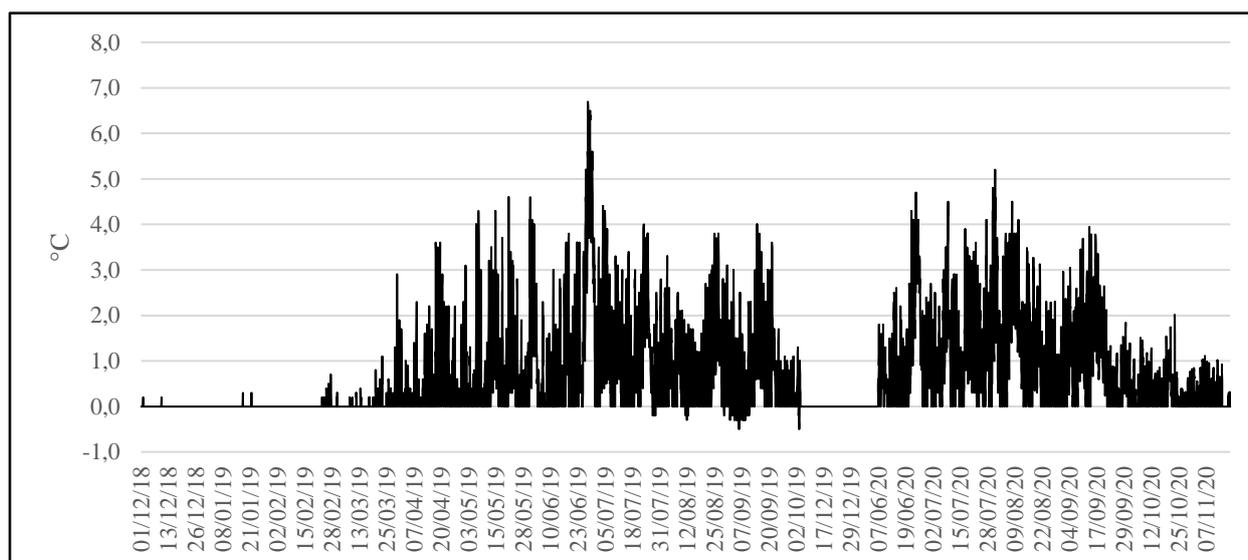


Figure 82 : Le Δ° (en °C) entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'aval de la retenue de seuil de Thévalles au cours de toute la période d'étude.

Même à l'amont de la retenue de seuil de Thévalles, les données collectées par la chaîne de thermomètres ont relevé l'existence d'un léger gradient thermique vertical entre la surface et le fond de la colonne d'eau, qui est particulièrement remarquable au cours des périodes les plus chaudes de l'année (tab. 19 et fig. 83). En effet, comme à l'aval, le gradient est nul ou très faible au cours des mois hivernaux, il s'accroît au cours des mois printaniers-estivaux et il s'affaiblit à partir des mois automnaux. Dans ce cas aussi, au cours de l'été et de l'automne, de légers gradients thermiques verticaux négatifs ont été observés au sein de la colonne d'eau.

Tableau 19 : Le gradient thermique verticale moyen, maximale positif et maximale négatif (en °C) entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'amont de la retenue de seuil de Thévalles au cours des saisons.

	GRAD. MOY.	GRAD. MAX. POSITIF	GRAD. MIN. NÉGATIF
Automne 2019	-0,3	0,0	-0,2
Hiver 2020	/	/	/
Printemps 2020	/	/	/
Été 2020	0,8	3,3	-0,3
Automne 2020	0,2	1,3	0,0

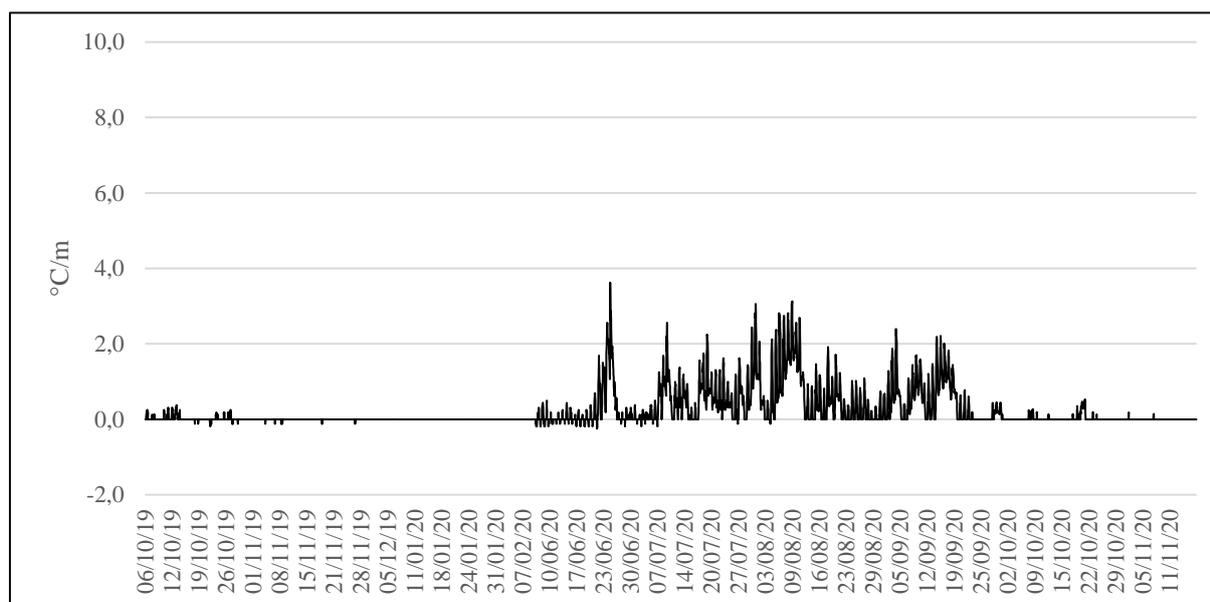


Figure 83 : Le gradient thermique entre la surface et le fond à l'amont de la retenue de seuil de Thévalles pendant toute la période d'étude (Réalisation : Francesco Donati).

Ces chiffres s'expliquent en analysant le Δ° , qui montre comment, pendant certaines périodes de l'étude, la colonne d'eau a été intéressée par des stratifications thermiques (tab. 20 et fig. 84). Entre le 06/06/2020 et le 18/11/2020, le Δ° moyen entre la surface et -0,25 m a été de 0,1 °C et celui entre la surface et -1,5 m de 0,6 °C : dans ce dernier cas, les moments caractérisés par un $\Delta^\circ \neq 0$ représentent 61 % de l'été et 10 % de la période automnale qui a été échantillonnée. Ici aussi, ils ont eu lieu notamment au cours de la deuxième partie de la journée, leur durée moyenne a été de 11 heures et 32 cycles de 24 heures ont été observés, dont 28 consécutifs. Durant les mois estivaux, le Δ° le plus fort qui a été observé entre la surface et le fond a été de 5,8 °C.

Tableau 20 : Le Δ° moyen, minimale et maximale (en $^\circ\text{C}$) entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'amont de la retenue de seuil de Thévalles au cours des saisons.

	Δ° MOY.	Δ° MAX.	Δ° MIN.
Automne 2019	0,0	0,6	-0,3
Hiver 2020	/	/	/
Printemps 2020	/	/	/
Été 2020	1,0	5,8	-0,4
Automne 2020	0,0	1,2	0,0

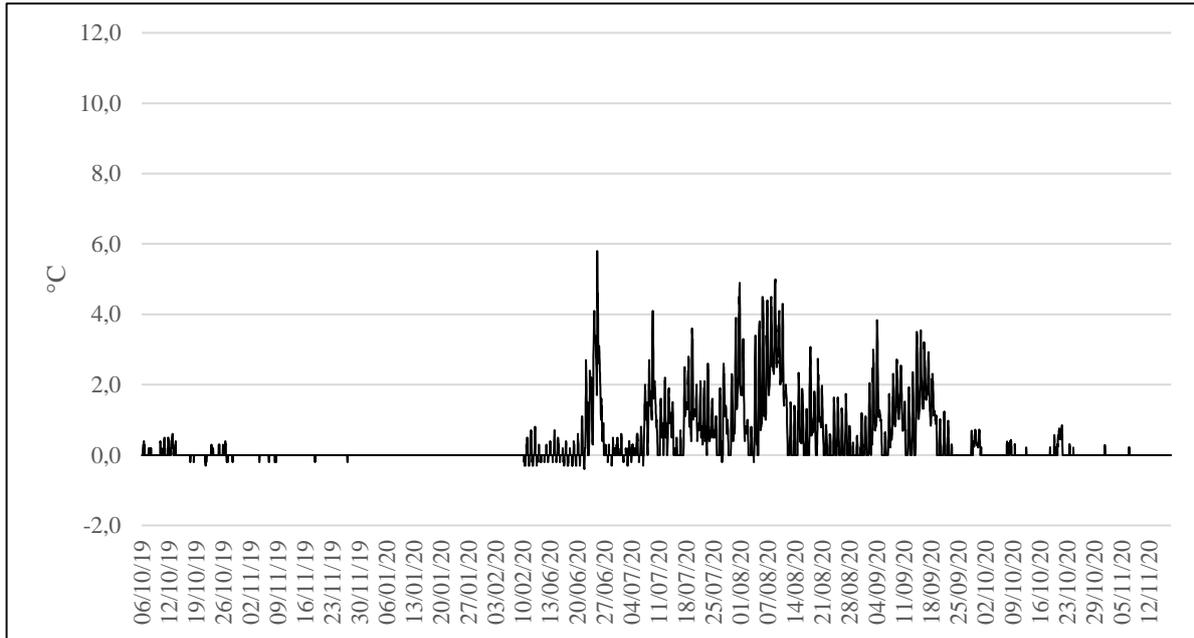


Figure 84 : Le Δ° (en $^\circ\text{C}$) entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'amont de la retenue de seuil de Thévalles au cours de toute la période d'étude (Réalisation : Francesco Donati).

À l'aval comme à l'amont, la présence de stratifications thermiques au sein de la colonne d'eau est confirmée par une analyse plus détaillée de l'évolution de la température aux différentes profondeurs (tab. 21 et 22). En effet, les amplitudes thermiques moyennes aux différentes profondeurs sont diverses aux différents niveaux de la colonne d'eau, différence qui s'accroît au cours des moments les plus chauds de l'année, quand les stratifications thermiques sont plus fortes et durables.

Tableau 21 : L'amplitude thermique moyenne (en °C) aux différents niveaux de la colonne d'eau à l'aval de la retenue de seuil de Thévalles.

	-0,10 m	-0,25 m	-0,5 m	1,5 m
Hiver 2019	0,9	0,9	0,9	0,9
Printemps 2019	2,2	1,4	1,0	1,0
Été 2019	2,7	3,1	0,8	0,6
Automne 2019	/	/	/	/
Hiver 2020	/	/	/	/
Été 2020	2,9	1,2	1,0	0,8
Automne 2020	1,3	1,0	0,8	0,7

Tableau 22 : L'amplitude thermique moyenne (en °C) aux différents niveaux de la colonne d'eau à l'amont de la retenue de seuil de Thévalles.

	-0,1m	-0,25 m	-0,85 m	-1,60 m
Automne 2019	0,6	0,6	0,6	0,6
Hiver 2020	/	/	/	/
Printemps 2020	/	/	/	/
Été 2020	1,8	1,2	/	0,7
Automne 2020	0,8	0,8	/	0,7

Les causes d'un tel fonctionnement thermique sembleraient être les variations de la température atmosphérique et celles du débit qui alimente la retenue de seuil : les premières joueraient le rôle de stratificateur, alors que les secondes joueraient le rôle de déstratificateur. Cela est appréciable quand on analyse le coefficient de corrélation (R) entre ces deux facteurs et la température de l'eau (tab. 23). Le coefficient de corrélation entre la température de l'eau et celle de l'air montre que ces deux variables évoluent simultanément, R étant proche de 1. Au contraire, le coefficient de corrélation entre la température de l'eau et le débit de l'Erve, mesuré dans la station de jaugeage la plus proche de ce terrain d'étude, est proche de -1, ce qui signifie que quand la deuxième variable augmente la première diminue. Le coefficient de corrélation avec les autres variables climatiques mesurées dans ce terrain d'étude montre des valeurs proches de 0, ce qui signifie qu'ils ont une très faibles influence sur la température de l'eau.

Tableau 23 : Le coefficient de corrélation entre les différentes variables climatiques et la température de l'eau à l'aval de retenue de seuil de Thévalles.

	T° -0,10 m	T° -0,35 m	T° -0,85 m	T° -1,60 m
Temp. Air	0,7	0,7	0,6	0,6
Vitesse Vent	0,2	0,2	0,1	0,1
Radiation Solaire	0,3	0,2	0,1	0,1
ET	0,4	0,3	0,2	0,2
Débit	-0,7	-0,8	-0,7	-0,7

Les deux cas suivants montrent concrètement les relations qui existent entre les vicissitudes thermiques qui se produisent au sein de la retenue de seuil de Thévalles et ces facteurs hydro-climatiques. Le premier exemple concerne les journées qui vont du 24 au 30/06/2019 ; il a été tiré des données collectées par la chaîne de thermomètres située le plus en aval et il est indicatif de l'effet stratifiant de la température atmosphérique (fig. 85) :

- Entre le 24 et le 25/06, un climat doux s'installe au-dessus de la retenue de seuil de Thévalles. La température moyenne de l'air est de 20,6 °C (température maximale 29,3 °C) et une petite perturbation aura lieu le 24/06 au soir (précipitations totales = 5 mm). Au cours de cette période, la colonne d'eau présente des stratifications thermiques au cours de la journée, lesquelles disparaissent au cours de la nuit : la différence de température maximale entre la surface et le fond sera de 3,4 °C, le 25/06 à 14:00.
- Entre les 26 et 30/06, des épisodes caniculaires particulièrement forts s'installent sur toute la France métropolitaine. Au moulin de Thévalles, la température moyenne est de 26,9 °C et la température maximale relevée est de 39,3 °C, le 29/06 à 16:00. Il est intéressant de remarquer qu'il s'agit d'un laps de temps assez ventilé, avec une vitesse moyenne du vent de 3,8 m/s et des vitesses maximales de 8 m/s, alors que pendant les journées du 24/06 et du 25/06 la vitesse moyenne du vent avait été de 1,9 m/s.
- Ces fortes chaleurs provoquent des stratifications thermiques de la colonne d'eau longues et intenses. Si entre la surface et 0,35 m de profondeur la température est quasiment homogène, entre 0,5 m et 1,5 m on enregistre des écarts thermiques durables et forts, dont les plus intenses sont respectivement de 4,2 °C et 6,4 °C. Ce dernier est, en absolu, le plus fort jamais observé au cours de toute la période d'étude.

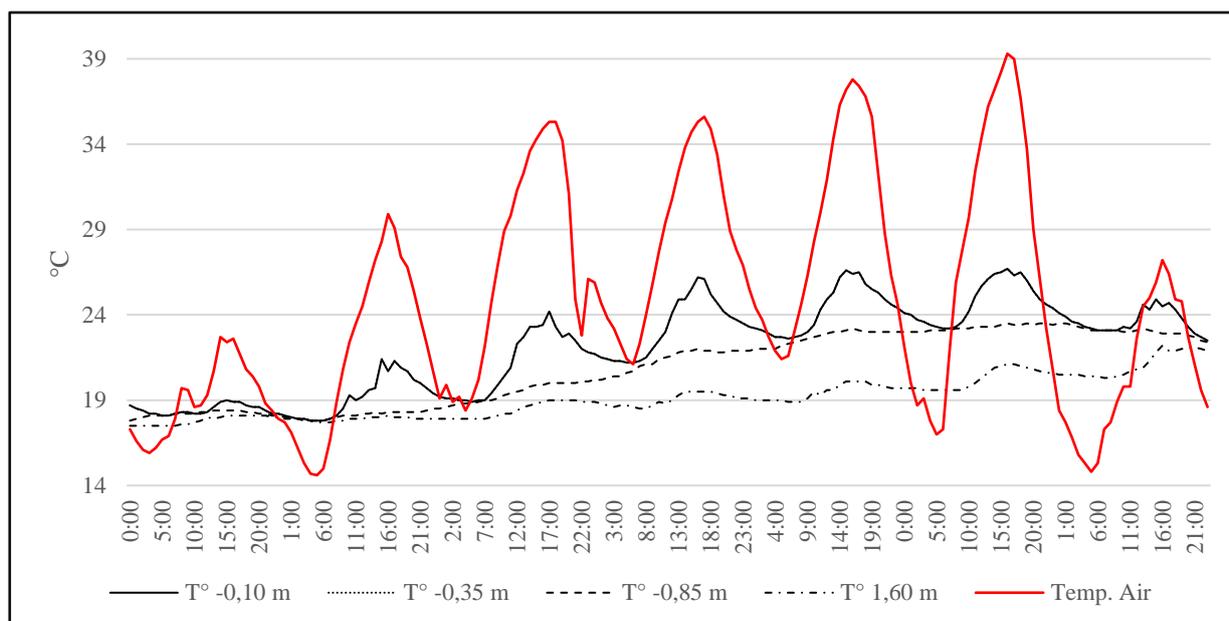
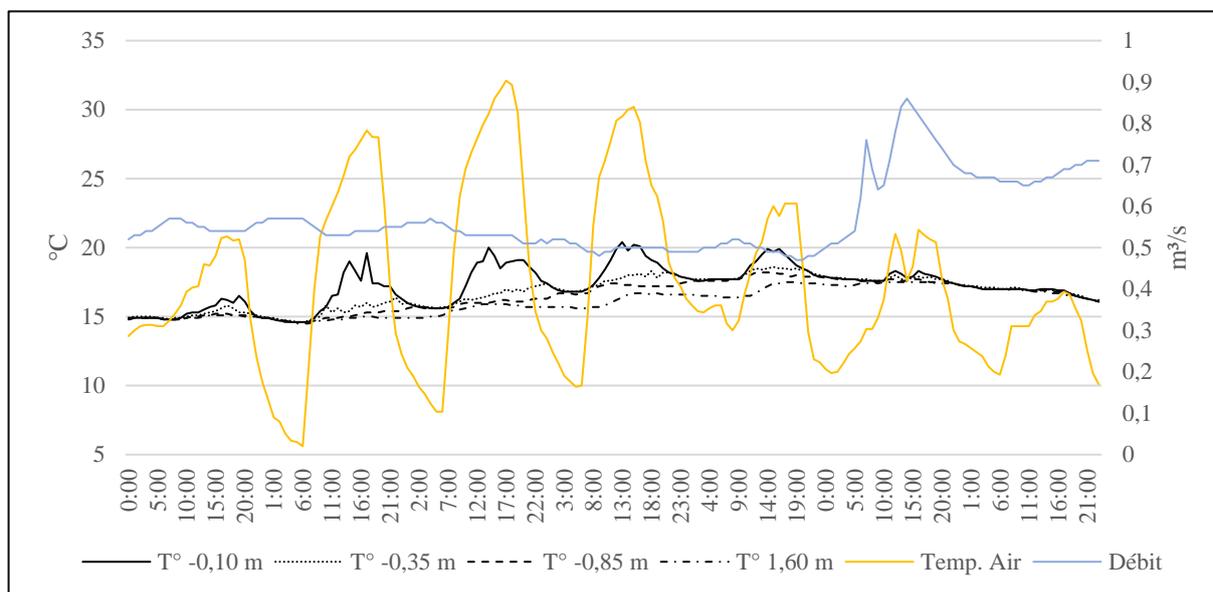


Figure 85 : L'évolution de la température de l'eau et de l'air et de l'eau à l'aval de la retenue de seuil de Thévalles entre le 24/05/2019 et le 30/06/2019 (Réalisation : Francesco Donati).

Le deuxième exemple concerne les journées qui vont du 30/05/2019 au 05/06/2019 et lui aussi a été tiré des données collectées par la chaîne de thermomètres la plus en aval et il est représentatif de l'effet que le débit et la température de l'air exercent sur la colonne d'eau (fig. 86) :

- À partir du 30/05, au-dessus de la retenue de seuil de Thévalles s'installe un climat mite. Au cours de cette journée et jusqu'au 02/06, la température moyenne de l'air est de 18,7 °C (température maximale = 32,1 °C), chaque jour il y a en moyenne 16 heures de lumière et les précipitations totales sont de 0,0 mm.
- Grâce à ces conditions climatiques la colonne d'eau se stratifie, présentant une différence maximale entre la surface et le fond de 4,1 °C, atteinte à deux reprises le 31/05 et le 01/06 à 14:00. La partie sommitale de la colonne d'eau se stratifie au cours de la journée et se déstratifie au cours de la nuit, alors que les eaux en profondeur présentent une température toujours différente.
- À partir du 03/06, le temps se dégrade et des pluies commencent à tomber sur le bassin versant de l'Erve : au moulin de Thévalles tomberont 20 mm de pluie, dont 12,5 mm le 04/06 entre 08:00 et 9:00.
- Cela entraîne une chute des températures (température moyenne = 15,7 °C) et une augmentation du débit. Si, au cours des journées précédentes, la station de jaugeage située quelques kilomètres en aval de la retenue de seuil avait enregistré des débits compris entre 0,6 et 0,5 m³/s, depuis le début de cette perturbation ils une valeur

maximale de $0,84 \text{ m}^3/\text{s}$ le 04/06 à 15:00. En concordance avec cet évènement, on observe dans la retenue de seuil une homogénéisation de la température de la colonne d'eau.



Au contraire, les deux cas suivants montrent concrètement comment les stratifications thermiques de la colonne d'eau évoluent, sous l'impulsion des facteurs hydro-climatiques qui les déterminent. Le premier exemple concerne la journée du 22/06/2020 ; il a été tiré des données collectées par la chaîne de thermomètres située la plus en amont et il est représentatif de la façon dont les stratifications thermiques se mettent en place au sein de la colonne d'eau (fig. 87) :

- À 00:00, d'un point de vue thermique, la colonne d'eau se présente quasiment homogène, les eaux situées en surface étant plus chaudes que celles en profondeur de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Dans le même temps, la température atmosphérique est de $11,9 \text{ }^\circ\text{C}$.
- À 6:00, ce dernier paramètre apparaît plus faible, la température de l'air étant de $6,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Dans la colonne d'eau, cela détermine un renversement de la situation initiale, avec les eaux en profondeur plus chaudes que celles en surface d'environ $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Entre 6:00 et 12:00, la température atmosphérique se réchauffe, atteignant $21 \text{ }^\circ\text{C}$ au milieu de la journée. Au cours de ce laps de temps, toute la colonne d'eau se refroidit

et à midi une légère différence de 0,2 °C sépare les eaux en surface de celles en profondeur²⁵.

- Entre 12:00 et 18:00, le réchauffement de la colonne d'eau se poursuit, atteignant 24,3 C° en fin d'après-midi. Pendant ce laps de temps, la différence thermique entre la surface et la profondeur s'accroît, avec les eaux en surface plus chaudes que celles en profondeur de 2,3 °C.
- En fin de journée, avec la baisse de la température de l'air, cette différence thermique au sein de la colonne d'eau s'amortit, mais elle perdurera pendant environ quatre jours consécutifs, s'intensifiant et atteignant un écart maximal entre la surface et le fond de la colonne d'eau de 5,8 °C le 25/06/2020.

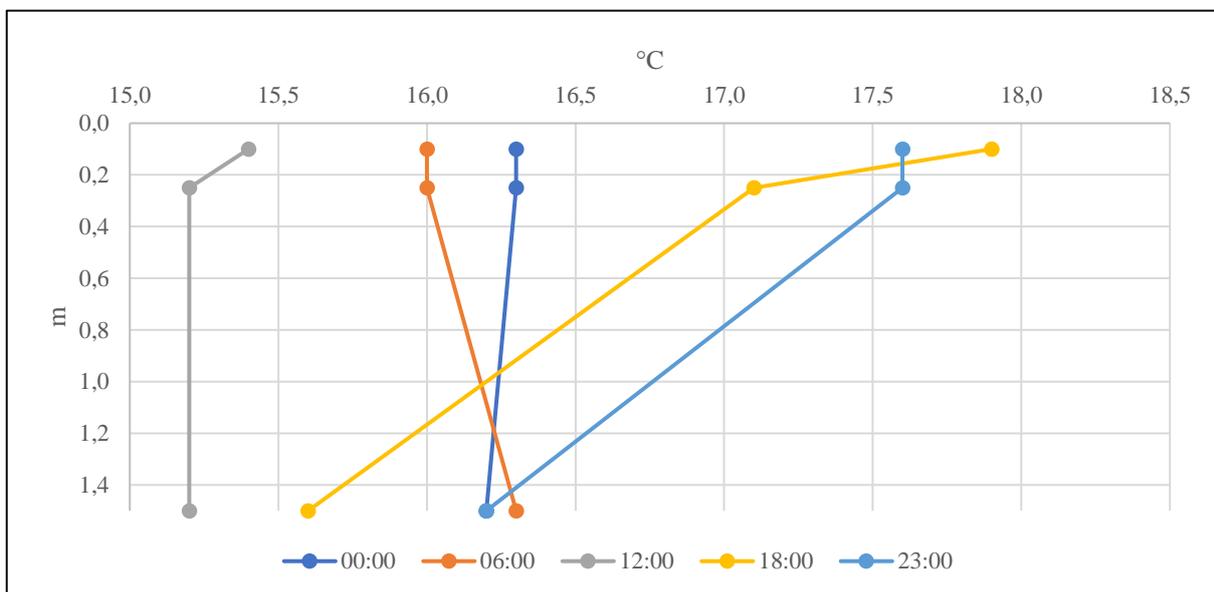


Figure 87 : L'évolution de la température de l'eau à l'amont de la retenue de seuil de Thévalles le 22/06/2020 (Réalisation : Francesco Donati).

Le deuxième exemple concerne la journée du 26/06/2020, c'est-à-dire la fin de la période de stratification thermique abordée dans le cas précédent. Il est particulièrement représentatif de la façon dont les stratifications thermiques se détruisent (fig. 88) :

- Après plusieurs jours météorologiquement calmes, caractérisés par des températures maximales qui ont largement dépassé les 30 °C à plusieurs reprises, les conditions

²⁵ Les possibles causes qui expliquent le fait que la température de l'eau diminue, alors que celle de l'air augmente sont deux : la première est qu'on se trouve on est dans la marge d'erreur des thermomètres et la deuxième est que les thermomètres sont arrivés, par hasard, à capter une dynamique très éphémère, celle d'un brassage turbulent en train de se faire. C'est ce qui expliquerait que cela se poursuive par un refroidissement dû au vent (seul facteur qui change considérablement au cours de cette période) pendant que la température atmosphérique augmente.

atmosphériques commencent à se dégrader, avec l'arrivée d'une petite perturbation qui rafraîchit les températures.

- Au début de cette journée, la colonne d'eau se présente stratifiée, comme elle l'a été continuellement au cours des trois journées précédentes. À minuit, une différence de 3 °C sépare les deux extrémités de la colonne d'eau, qui s'accroîtra au cours de la nuit et dans la première partie de la matinée, comme on l'a vu comme dans l'exemple précédent.
- Au cours de la deuxième partie de la journée, la dégradation des conditions météorologiques fait que cette différence de température entre les eaux superficielles et celles en profondeur continue à s'amoinrir, à tel point que, à 23:00 heures, la différence de température entre les deux extrémités de la colonne d'eau est seulement de 0,4 °C.
- L'homogénéité thermique sera atteinte à 6:00 le 27/06. Dans ce cas, l'écoulement de l'Erve n'a pas contribué à la déstratification de la colonne d'eau, puisqu'il n'est pas tombé de pluies qui auraient pu la grossir (elles tomberont à partir de 10:00 le 27/06). Toutefois, nous supposons que le vent peut avoir facilité la destruction des stratifications thermiques, au même titre que la chute de la température atmosphérique. En effet, une brise a soufflé sur ce terrain d'étude tout au long de ces deux journées, alors qu'au cours des trois jours précédents, le vent avait été faible et sporadique.

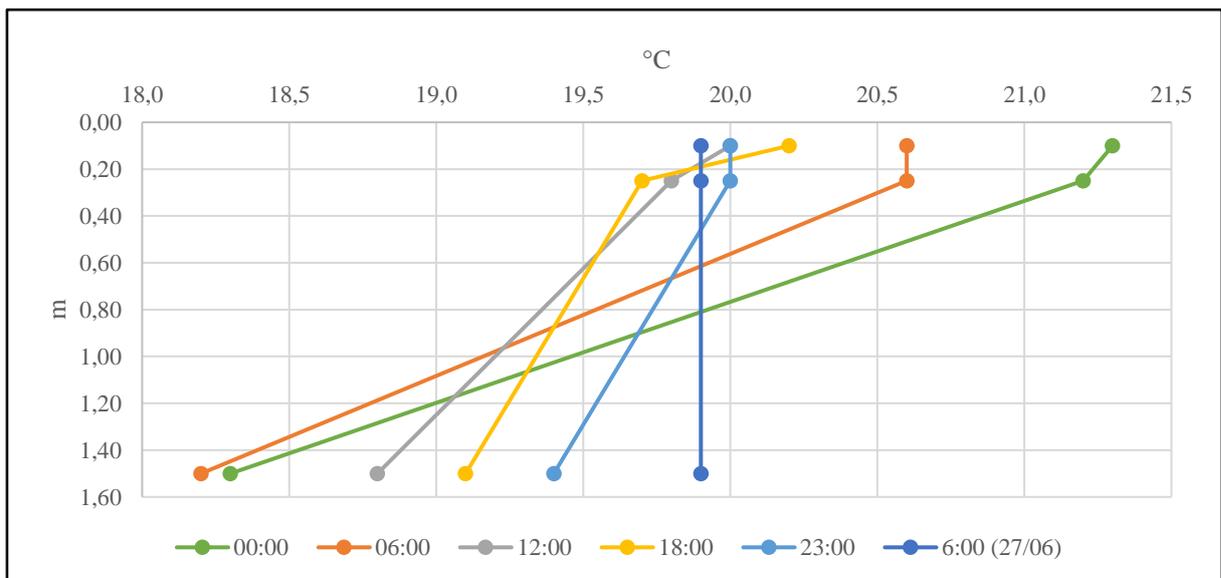


Figure 88 : L'évolution de la température de l'eau à l'amont de la retenue de seuil de Thévalles le 26 et 27/06/2020 (Réalisation : Francesco Donati).

Ci-bas, nous rapportons un dernier exemple relatif à la température de l'eau dans la retenue de seuil de Thévalles. Il concerne la journée du 15/09/2020, au niveau de la bouée le plus en aval et il vise à démontrer comment la colonne d'eau de ce terrain d'étude est subdivisée en masses d'eau distinctes à travers une couche de saut thermique. En effet, bien que le nombre de thermomètres que nous avons installés sous chaque bouée ne nous consente pas de réaliser une analyse très détaillée, nous pouvons quand même avoir une idée approximative de cette strate (fig. 89) :

- À 00:00, entre la surface et le fond de la colonne d'eau nous avons une différence de 1,8 °C et une couche de saut thermique semble exister autour de 0,5 m de profondeur. En effet, comme on peut le voir du graphique, à cet endroit la courbe s'infléchit soudainement le profil thermique.
- À 6:00, la colonne d'eau est parfaitement homogène entre la surface et 0,5 m de profondeur, mais une différence de 0,8 °C existe entre la surface et le fond. Nous pouvons donc supposer qu'entre 0,5 m et 1,50 m de profondeur une couche de saut thermique, bien que faible.
- À 12:00, on retrouve une situation similaire à celle de minuit avec un fort gradient de température autour de 0,5 m.
- À 18:00, la couche de saut thermique semblerait se rehausser, car le gradient maximal de température nous le retrouvons entre 0,25 m et la surface.
- Au contraire, à 23:00 sa profondeur semble diminuer encore et nous le retrouvons autour de 0,5 m.

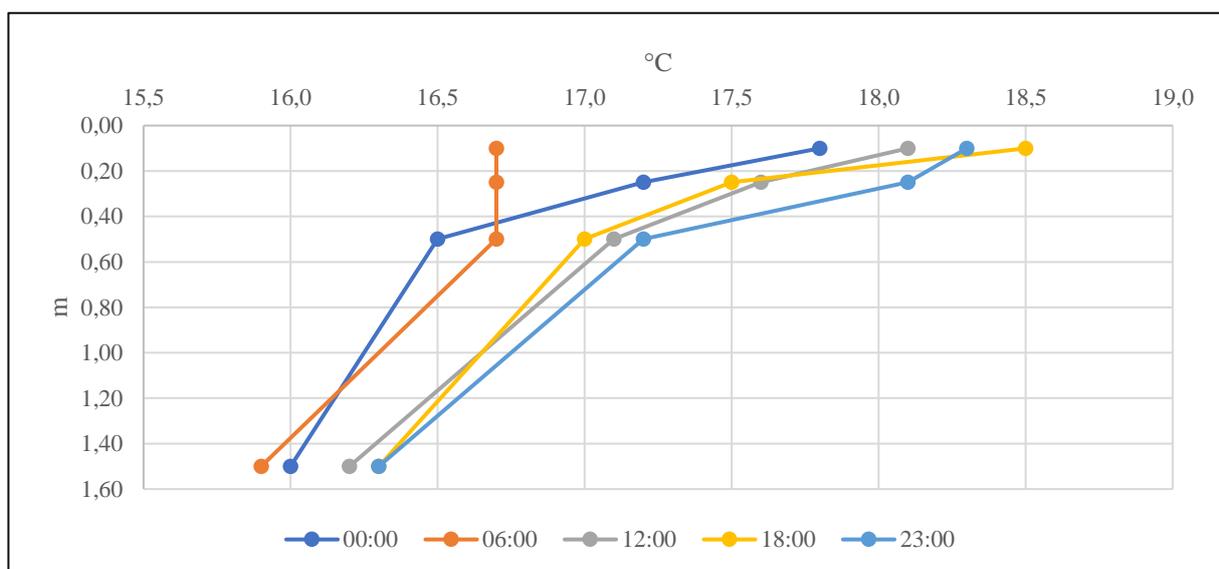


Figure 89 : L'évolution de la température de l'eau à l'aval de la retenue de seuil de Thévalles le 15/09/2020 (Réalisation : Francesco Donati).

Pour résumer, les résultats de l'étude thermique effectuée à l'amont du petit seuil en rivière de Thévalles montrent que la colonne d'eau de cette retenue de seuil est globalement homogène au cours des saisons les plus fraîches et arrosées de l'année. En revanche, au cours des périodes sèches et chaudes, des stratifications thermiques évidentes se mettent en place, lesquelles peuvent durer pendant plusieurs jours d'affilée quand des journées particulièrement chaudes surviennent. Elles sont générées par les variations de la température atmosphérique et elles sont détruites par les débits. Aucune différence considérable n'a été constatée entre le fonctionnement thermique de la partie en ombre de la retenue de seuil et celle exposée au soleil. Mais qu'en est-il du fonctionnement hydrodynamique de ce type de retenue de seuil ?

3.3.2 Les résultats de l'étude hydrodynamique

Les jaugeages effectués au cours des différentes campagnes de mesure ont permis de mesurer un débit moyen qui alimente la retenue de seuil de $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$, c'est-à-dire $1440 \text{ m}^3/\text{h}$. Cette donnée corrélée à celle relative au volume de la retenue de seuil (qui, on le rappelle, est de 31000 m^3), ont permis d'estimer un temps de séjour moyen des eaux d'environ 22 heures. Ce chiffre montre une différence certaine entre la retenue de seuil de Thévalles et celles précédemment étudiées symbolisant des seuils de petite dimension. Mais qu'en est-il du fonctionnement sédimentaire de ce type de retenue de seuil ?

3.3.3 Les résultats de l'étude sédimentaire

Contrairement à celles collectées dans les autres terrains d'étude, les données bathymétriques relatives à la retenue de seuil de Thévalles n'ont pas mis en évidence l'existence d'une strate de particules qui recouvre ses fonds : les fonds apparaissent assez solides, tant et si bien que la barre la barre graduée ne s'y est jamais enfoncée. Nous précisons que ce type de campagne de mesure a eu lieu au cours de l'été 2020, donc après les crues successives qui ont intéressé l'Erve au cours de cette année. D'un point de vue granulométrique, les échantillons collectés montrent une nette différence entre la partie amont et la partie aval de la retenue de seuil (fig. 90). Dans le premier secteur, la granulométrie des sédiments est plutôt grossière, la classe des graviers étant particulièrement représentée. Au contraire, dans le deuxième secteur, la granulométrie des sédiments s'affine et ce sont les classes des sables qui deviennent les plus représentées au sein des échantillons.

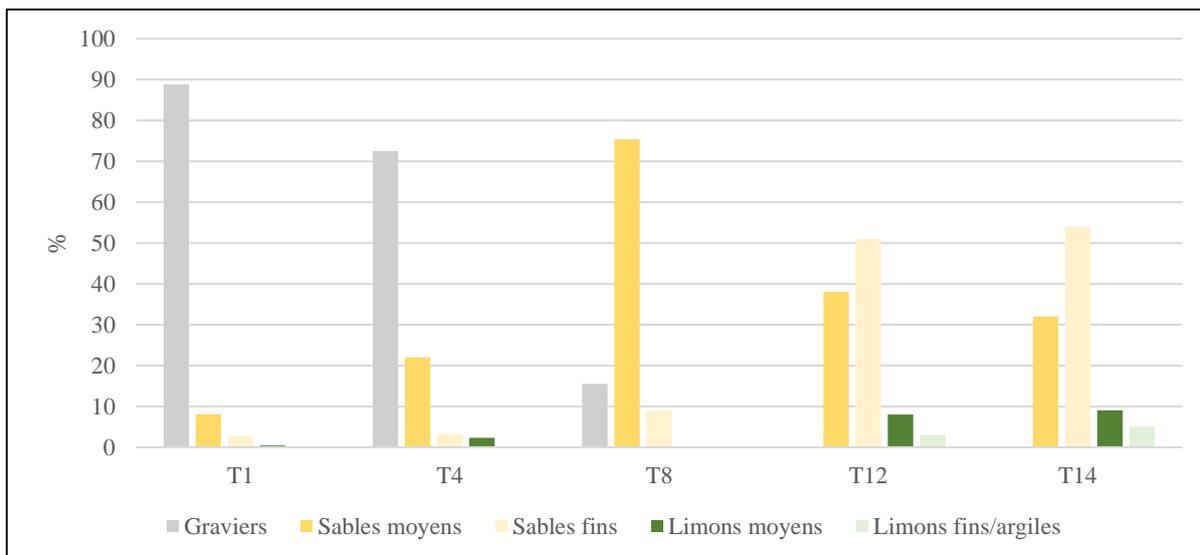


Figure 90 : La granulométrie des échantillons collectés dans la retenue de seuil de Thévalles (Réalisation : Francesco Donati).

Pour résumer, les résultats sédimentaires obtenus à l’amont du grand seuil de Thévalles montrent l’existence d’une couche de sédiments qui recouvre les fonds de cette retenue de seuil. Nous avançons l’hypothèse que ce fait est à attribuer au fait que les campagnes de mesures ont été réalisées après une série de crues. Contrairement aux autres terrains d’étude, dans ce site la classe granulométrique des graviers est particulièrement représentée, mais uniquement à l’amont de la retenue de seuil, où on peut supposer que les vitesses de l’écoulement sont les plus importantes. Pour clore ce travail sur le seuil de Thévalles où malheureusement plusieurs informations sont manquantes, il apparaît que sur le plan thermique, seul élément abiotique correctement étudié, le fonctionnement s’avère très différent des précédentes retenues de seuil. En effet, nous avons notamment mesuré de véritables stratifications thermiques, intenses et pouvant durer plusieurs jours consécutifs.

CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE

Pour apporter une réponse à la problématique de cette recherche, nous avons mis en place une méthodologie qui se base sur des techniques couramment utilisées en Limnologie et plus précisément dans les études qui concernent les étangs. L'étude du compartiment thermique a été placée au centre de cette démarche, étant le seul qui consente de distinguer avec certitude si le fonctionnement des espaces situés à l'amont des seuils en rivière est lentique ou lotique. Les données thermiques ont été collectées à travers le déploiement de chaînes de thermomètres, qui permettent d'observer l'éventuelle présence de strates d'eau distinctes au sein de la colonne d'eau. En raison de l'importance que nous consacrons à ce paramètre, les sondes qui ont été utilisées sont capables d'enregistrer la température de l'eau en continu et de travailler de manière autonome pendant des longues périodes. Le volet hydrodynamique a été étudié avec un courantomètre doppler, le FlowTracker 2. Le choix de cet instrument repose sur sa large gamme de possibilités, car il permet de collecter en même temps plusieurs types de données hydrodynamiques, comme la vitesse et la direction des flux d'eau. Ces données ont été ensuite exploitées pour mesurer l'énergie de l'écoulement, afin d'analyser sa compétence sédimentaire, le temps de séjours des eaux et l'éventuelle présence de flux d'eau pluridirectionnels. Le volet sédimentaire a été étudié en examinant la présence et la nature d'une éventuelle couche de sédiments qui recouvre le fond des retenues de seuil. La nature des particules qui la composent a été étudiée en prélevant des échantillons de sédiments à l'aide d'un carottier, qui par la suite ont été examinés pour déterminer le diamètre des particules et établir s'il existe un gradient granulométrique amont-aval, comme c'est le cas dans les retenues.

Cette méthodologie a été mise en pratique dans trois retenues de seuil situées en France métropolitaine, sélectionnées sur la base de la taille de l'ouvrage qui les forme, afin de pouvoir étudier des terrains d'étude représentatifs de chaque échelle géographique. Plus précisément, elles ont été sélectionnées pour pouvoir analyser les effets provoqués par des ouvrages de faible taille (0,50 m), de taille moyenne (1 m) et de grand taille (2 m) : le premier site consiste dans la retenue de seuil du moulin de Saint-Hilaire dans le Loiret, le deuxième dans la retenue de seuil de Baerenthal dans la Moselle et le troisième dans la retenue de seuil du moulin de Thévalles dans la Mayenne.

Dans ces trois sites, notre méthodologie a permis de collecter plusieurs milliers des données, lesquelles nous montrent le fonctionnement des trois compartiments abiotiques au centre de cette recherche dans les différents types de retenues de seuil :

- D'un point de vue thermique, à Saint-Hilaire et Baerenthal, la colonne d'eau se présente comme thermiquement homogène pendant la plupart des saisons de l'année et, uniquement pendant l'été, des très faibles hétérogénéités se mettent en place. Ce même type de fonctionnement a été constaté également à Thévalles, avec la différence qu'ici les différences entre la surface et le fond de la colonne d'eau sont beaucoup plus longues et fortes par rapport aux deux autres terrains d'étude. Considérablement différent est le fonctionnement thermique que nous avons observé dans l'étang de Baerenthal, où les stratifications thermiques peuvent durer pendant plusieurs semaines, avec une différence entre la température en surface et en profondeur de plusieurs dizaines de degrés. Notre intérêt d'étudier l'effet de la ripisylve sur le fonctionnement thermique des retenues de seuil n'a pas amené à des résultats significatifs. En effet, les zones des retenues de seuil exposées au soleil et celles ombragées présentent un fonctionnement thermique quasiment identique. Cela est particulièrement visible dans le terrain d'étude de Thévalles, quand on compare les données collectées à l'amont et à l'aval de la retenue de seuil.
- Dans toutes les retenues de seuil où le compartiment hydrodynamique a été étudié, l'écoulement du tributaire est fortement ralenti par le seuil en rivière, faisant en sorte que l'énergie des flux d'eau qui se développent dans cet environnement soit très faible. Toutefois, aucun mouvement d'eau pluridirectionnel n'a jamais été observé.
- D'un point de vue sédimentaire enfin, à Saint-Hilaire et Baerenthal, on assiste à un brusque changement de compétence du tributaire et on observe l'existence d'une couche de sédiments plus ou moins épaisse. Au contraire, à Thévalles, les mesures que nous avons effectuées n'ont pas mis en évidence l'existence d'une couche de sédiments qui recouvre les fonds. La granulométrie des particules qui se trouvent sur le fond de ces trois terrains d'étude varie longitudinalement en fonction de la vitesse de l'écoulement, avec les sédiments les plus grossiers qui se situent à l'entrée de la retenue de seuil et ceux les plus fines dans les secteurs qui se trouvent immédiatement après.

L'ensemble de ces résultats donne un aperçu quasiment inédit sur la nature des retenues de seuil. Ils permettent de définir leur fonctionnement et d'apporter ainsi une réponse à la problématique de cette recherche

III^{ÈME} PARTIE :
COMMENT DOIT-ON APPRÉHENDER LE FONCTIONNEMENT DES
RETENUES DE SEUIL ?

INTRODUCTION À LA TROISIÈME PARTIE

Est-ce que les seuils en rivière transforment les cours d'eau en plans d'eau ? Ou alors, est-ce qu'ils les transforment en un environnement hybride, qui croise à la fois des traits lotiques et des traits lenticques ? Si oui, quel est le niveau d'hybridation d'une retenue de seuil ? Quel est son fonctionnement ? Après avoir compris quels sont les grands principes qui différencient les divers types de milieux aquatiques, avoir mis en place une méthodologie qui permette de les étudier et avoir collecté les données nécessaires, le scientifique qui veut discerner à propos de la nature des retenues de seuil possède maintenant tous les éléments pour apporter une réponse à ces questions, qui sont à la base de la problématique de cette recherche.

Ainsi, la quatrième et dernière partie de ce travail sera entièrement consacrée à la réponse de ces interrogations, à l'identification de la nature des retenues de seuil. Elle se composera de deux chapitres :

- I. Dans le premier, afin de bien définir leur caractéristique, nous essayerons de déterminer quels sont les traits saillants du fonctionnement abiotique des trois retenues de seuil que nous avons étudiées au cours de cette recherche, à partir des résultats bruts que nous avons obtenus à travers l'application de la méthodologie que nous avons créée. Au cours de ce chapitre, nous essayerons de comprendre également quels sont les phénomènes qui déterminent leur fonctionnement.
- II. Dans le deuxième, sur la base de considérations spécifiques aux trois terrains d'études que nous réaliserons dans le premier chapitre, nous essayerons de passer du spécifique au général, tentant de définir la nature et le fonctionnement d'une quelconque retenue de seuil. Dans ce chapitre, nous essayerons également de comparer le fonctionnement des retenues de seuil à celui des autres milieux aquatiques : pendant cette phase, une attention particulière sera consacrée aux autres types de retenues, pour comprendre si, oui ou non, l'effet d'un seuil en rivière peut être mis sur le même plan d'un étang ou un lac de barrage.

Comme pour la première, la rédaction de cette quatrième partie se base sur un solide corpus bibliographique, composé d'un grand nombre d'ouvrages différents. Particulièrement utilisées seront celles qui abordent la notion d'hybridité : en effet, comme on le verra par la suite ce mot sera le fil conducteur de cette troisième partie.

1. LE FONCTIONNEMENT DES TROIS SEUILS EN RIVIÈRE

Au cours de la première partie, nous avons abordé les caractéristiques hydrodynamiques, sédimentaires et thermiques qui particularisent les milieux lotiques, les milieux lenticques et les milieux hybrides. À partir de l'exposition « brute » des résultats obtenus dans les trois terrains d'étude que nous avons réalisée dans la partie précédente, nous pouvons maintenant essayer de tracer quels sont les principaux processus qui particularisent le fonctionnement des retenues étudiées au cours de cette recherche, afin de comprendre quelle est la réelle nature de ces environnements. Pour faire cela, nous pensons qu'il convient de traiter séparément les retenues de seuil de Saint-Hilaire et Baerenthal et celle de Thévalles.

1.1 Le fonctionnement des retenues de seuil de Saint-Hilaire et Baerenthal

Les résultats obtenus à l'amont du petit seuil en rivière de Saint-Hilaire et de celui de taille moyenne de Baerenthal nous montrent très clairement que les relatives retenues de seuil ne fonctionnent pas comme des milieux lenticques. Toutefois, certains aspects que nous avons observé dans ces deux environnements nous suggèrent que leur fonctionnement n'est pas complètement lotique, nous poussant à les définir comme étant hybrides.

1.1.1 *Une hybridité thermique ?*

Selon nous, le fait qui montre le plus clairement que ces deux terrains d'étude ne fonctionnent pas comme des plans d'eau sont leurs caractéristiques thermiques. Dans ces deux sites, elles sont très similaires : pendant la seconde partie de l'automne, la totalité de l'hiver et le début du printemps, leur colonne se présente parfaitement homogène d'un point de vue thermique, alors qu'elle est fréquemment intéressée par des inégalités thermiques entre la surface et le fond durant la fin du printemps, l'été et le début de l'automne. Ces dernières sont de courte durée et de faible intensité, perdurant quelques heures seulement en milieu de journée et la différence entre les divers niveaux de la colonne d'eau ne va presque jamais au-delà de 1 °C. À première vue, on pourrait être amené à penser que ces faibles variations thermiques estivales qui se développent au sein de la colonne d'eau de ces deux retenues de seuils sont des stratifications thermiques, fait qui démontrerait que leur fonctionnement est lenticque : mais est-ce vraiment le cas ? L'analyse des cycles thermiques journaliers à chaque profondeur nous pousse à donner une réponse négative à cette question, les amplitudes thermiques étant égales à tous les niveaux, ce qui démontre que la colonne d'eau n'est pas subdivisée en strates d'eau distinctes fonctionnant indépendamment les unes des autres.

Les données collectées dans la queue de l'étang de Baerenthal, dans les mêmes conditions hydrologiques et climatiques, viennent renforcer cette hypothèse, car elles montrent un fonctionnement thermique complètement différent de celui de la retenue de seuil située peu en aval. En effet, dans le plan d'eau, la colonne d'eau est très souvent stratifiée, pas seulement pendant la saison estivale, mais aussi au cours de l'hiver, avec la mise en place de stratifications thermique directes, mais aussi inverses. Dans les deux cas, les différences thermiques entre la surface et le fond sont de l'ordre de plusieurs degrés Celsius, qui peuvent durer pendant plusieurs semaines consécutives : un exemple sans conteste d'un plan d'eau polymictique discontinu. De même, dans l'étang de Baerenthal, les cycles thermiques diffèrent d'un niveau à l'autre de la colonne d'eau, avec des amplitudes thermiques considérablement plus notables en surface qu'en profondeur, fait qui démontre que le volume d'eau contenu dans l'étang est subdivisé en masses d'eau distinctes. Un autre sujet de réflexion qui prouve à quel point le fonctionnement thermique de la retenue de seuil est différent de celui du plan d'eau nous est fourni par un approfondissement que nous avons réalisé dans le cadre d'un projet financé par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse. Il visait à comprendre le fonctionnement et l'impact thermique de l'étang de Baerenthal et nous a fourni la possibilité d'exécuter une analyse à plus large échelle des données collectées dans la retenue de seuil de Baerenthal, les intégrant à d'autres données collectées en amont et en aval de ce secteur de tête de bassin versant la Zinsel du Nord. Les résultats de cette étude²⁶ ont montré que l'étang de Baerenthal réchauffe les eaux du cours d'eau en été et les refroidit au cours de l'hiver, un effet commun à ce type de retenue et généralement à tous types de plans d'eau artificiels. En revanche, dans la retenue de seuil, non seulement ce type d'impact n'a jamais été observé, mais l'espace à l'amont du seuil en rivière ne semble pas empêcher la normale récupération thermique de la rivière, un comportement qu'on peut classer comme lotique. Comme on peut le voir sur la figure 91, Choffel (2019), qui lui aussi avait étudié dans le détail l'impact thermique de cet étang dans le cadre du même projet et de sa thèse de doctorat, était arrivé indirectement au même type de conclusions.

²⁶Les résultats de cette étude ont été publiés dans les annales du PNR des Vosges du Nord, dans l'article intitulé : « Analyse des échanges thermiques entre les étangs et le réseau hydrographique du bassin versant de la Zinsel du Nord : contribution à la différenciation entre les impacts isolés et cumulés des plans d'eau » (Donati et al., 2021).

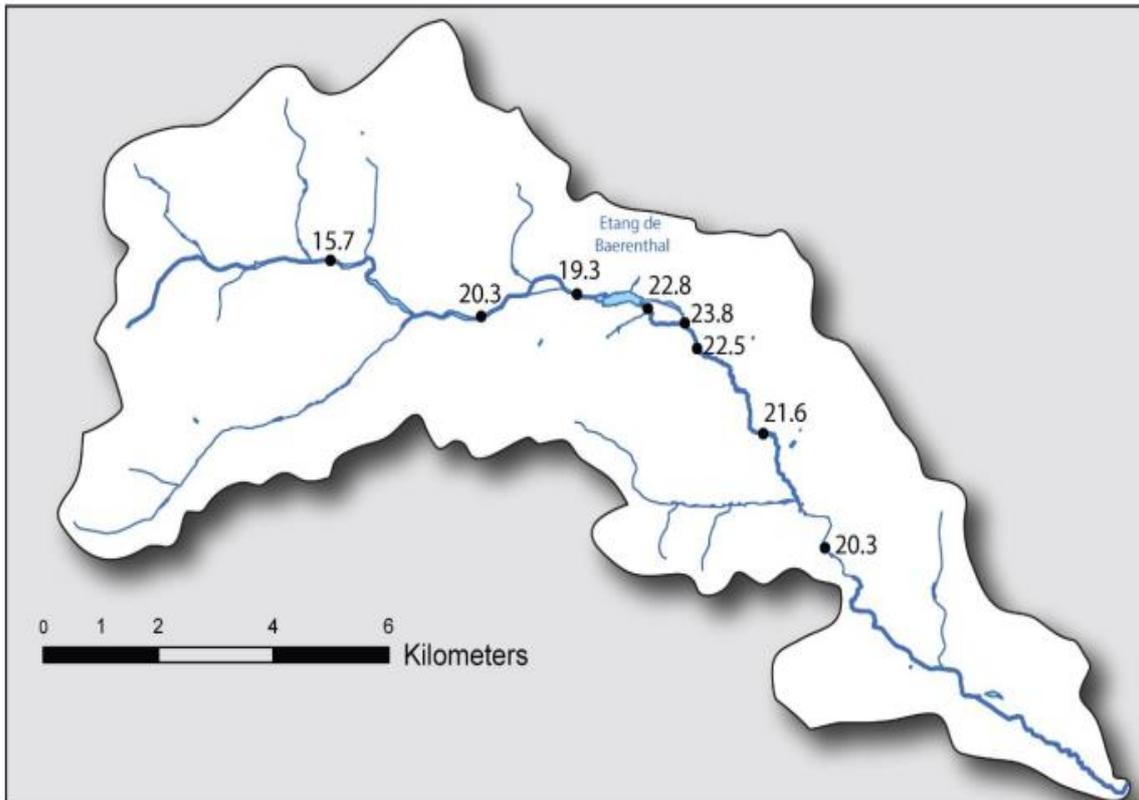


Figure 91 : L'évolution de la température moyenne de l'eau à l'amont et à l'aval de l'étang de Baerenthal : la retenue seuil se situe dans le deuxième point à l'aval du plan d'eau (Source : Choffel, 2019).

Les petites variations de température que nous avons constatées dans ces deux retenues de seuil semblent être déterminées par une plus grande sensibilité de la strate superficielle de l'eau aux variations de la température atmosphérique, car quand on croise ces deux variables dans le même graphique, on voit très clairement qu'elles évoluent de façon presque identique, alors qu'un petit décalage existe avec les eaux situées plus en profondeur, qui se réchauffent moins et après les eaux superficielles. À Baerenthal, un grand nombre de ces épisodes ayant lieu pendant la nuit et présentant un Δ° négatif, nous pouvons également supposer que à déterminer cette différence de température intervient également les phénomènes de refroidissement convectif, qui déterminent la perte de chaleur des strates d'eau les plus superficielles (Lemmin, 1995). Au contraire, le débit des cours d'eau qui alimentent ces deux retenues de seuil semble jouer le rôle inverse, c'est-à-dire celui d'homogénéisateur de la colonne d'eau, de destructeur de ces courts moments d'hétérogénéité.

1.1.2 Une hybridité hydrodynamique ?

Pour ce qui concerne la direction des flux, n'ont pas été observés de courants qui se meuvent aléatoirement, sous l'action d'une force externe à la retenue de seuil. En effet, les données collectées montrent de façon très claire que les eaux se déplacent uniquement de

l'amont vers l'aval, comme dans les milieux lotiques. En outre, dans le terrain d'étude loirétain, non seulement il est évident qu'elles empruntent exclusivement une trajectoire longitudinale, mais aussi qu'elles se déplacent en suivant la morphologie de la retenue comme c'est le cas pour les écoulements fluviaux. Le seul angle de vitesse qui peut suggérer un courant de type lentique a été observé une fois seulement dans la verticale la plus proche d'une berge de la retenue de seuil de Saint Hilaire (on le rappelle : -120° , à côté de la berge gauche du transect 1) ; sur la base des concepts abordés dans la première partie, nous sommes amenés à classer cette mesure aberrante comme une preuve du fonctionnement hydrodynamique lotique de cette retenue de seuil. En effet, on a vu comment dans les fleuves et les rivières, les zones à proximité des parois du lit sont celles les plus soumises aux turbulences, les forces de frictions étant ici particulièrement actives. Nous supposons alors que la valeur de cet angle de vitesse est due à ce phénomène qui a généré une sorte de courant de retour et pas à un flux d'eau qui se déplace en sens contraire du lit.

Pour ce qui concerne les temps de séjour des eaux, le plus grand volume d'eau et le ralentissement de l'écoulement engendrés par un seuil en rivière ne provoquent pas forcément des temps de séjours longs, comme le démontrent les valeurs de ce paramètre que nous avons mesurées à Baerenthal et Saint-Hilaire. Ici, la valeur de ce paramètre ne dépasse jamais l'échelle diurne, ayant une durée d'à peine une heure, un temps largement inférieur au seuil temporel de 10 jours que Straskraba et al. (1993) estiment nécessaire pour la manifestation d'un fonctionnement lentique. Certes, on peut imaginer que dans des tronçons fluviaux qui sont traversés par un débit similaire et qui ne sont pas délimités à leur aval par un seuil en rivière, les temps de séjour seraient encore plus courts, mais les temps que les eaux passent à l'intérieur de ces deux retenues de seuil ne semblent pas assimilables à ceux qu'on observe dans les milieux lenticques, où généralement elles demeurent plusieurs jours d'affilée.

Si nous nous étions arrêtés à l'analyse de la direction des flux et du temps de séjour des eaux, nous aurions pu affirmer que le fonctionnement de ces deux environnements était très clairement lotique. Toutefois, l'analyse de l'énergie des eaux renverse la situation. En effet, il est indéniable que l'écoulement des cours d'eau qui alimentent les retenues de seuil de Baerenthal et Saint-Hilaire subit une brusque décélération et une perte de son énergie, sous l'effet du seuil en rivière. Les valeurs du nombre de Froude qui ont été observées renvoient à celles qu'on pourrait rencontrer dans les mouilles, des habitats fluviaux considérés par la littérature scientifique comme des écotones, des milieux hybrides, comme nous l'avons vu dans

la première partie de cette recherche. Nous pensons que cette considération est très importante : bien qu'elles soient hydromorphologiquement différentes, la première étant due à un rehaussement de la ligne d'eau et la deuxième à un surcreusement du lit de la rivière, les retenues de seuil et les mouilles fluviales semblent donc partager le même type de nature²⁷.

1.1.3 Le fonctionnement sédimentaire des retenues de seuil de Saint-Hilaire et Baerenthal

À l'amont de ces deux seuils en rivière, on assiste à un changement de la magnitude de ce paramètre, mais pas à son annulation, avec la conséquente sédimentation d'une partie de la charge sédimentaire. En effet, la perte d'énergie que l'écoulement subit au contact des seuils en rivière étudiés amène au dépôt d'une partie seulement des sédiments, comme dans une sorte de tamis : sont principalement piégées les particules grossières, alors que les plus fines sont laissées libres de circuler, comme l'a mis en évidence le croisement entre les vitesses mesurées et le diagramme de Hjulström (mais aussi les analyses granulométriques qui ont relevé une faible présence de sédiments fins).

Cela amène à la formation d'une couche de sédiments qui recouvre les fonds, comme nous avons pu le constater dans ces deux retenues de seuils en rivière. L'épaisseur de cette strate suit quasi-parfaitement la décélération de l'écoulement et le notable changement de compétence, augmentant au fur et à mesure que la vitesse diminue et devenant plus consistante au niveau de la zone où l'énergie des eaux est la plus faible. Toutefois, contrairement à celles qui recouvrent les fonds des plans d'eau, les couches de sédiments qui ont été examinées dans les différentes retenues de seuil sembleraient évoluer au rythme des crues, comme le montrent

²⁷ Cette affirmation peut induire en erreur, car elle peut faire penser que le nom des seuils en rivière dérive de l'effet qui ils engendrent à leur amont, qui est similaire à celui de la succession seuil-mouille. Nous pensons que cette vision est erronée. En effet, bien que nous n'ayons pas réussi à établir l'origine exacte du mot seuil, nous avons apuré que jusqu'aux premières années du XX^{ème} siècle le nom français pour cet ouvrage hydraulique était barrage, comme on peut le voir dans les ouvrages d'ingénierie de l'époque (e.g. Chanoine, 1855; Minard, 1851; Vigreux, 1888) ; cela avait attiré l'attention de l'ingénieur anglais Vernon-Harcourt (1882), qui remarque comme en anglais un mot spécifique existe pour cet ouvrage hydraulique (weir), alors que ce n'est pas le cas. Nous pensons que le mot seuil est une sorte d'onomatopée qui renvoie au geste qu'un homme fait pour franchir le seuil d'une porte, qui est justement celui de ralentir et soulever la jambe. À un certain moment de l'histoire quelqu'un a dû commencer à utiliser cette métaphore pour différencier les seuils en rivière des barrages. En outre, le mot seuil n'est pas univoque au sein de la France : à titre d'exemple, dans le Sud du pays, ces ouvrages hydrauliques sont appelés « chaussés », comme nous avons pu le constater nous-même en parlant avec des propriétaires de moulin provenant de cette zone.

les données collectées à Saint-Hilaire. Nous pensons que ces caractéristiques sédimentaires sont un important indice de la nature hybride de retenues de seuil, qui ne sont suffisamment lenticques pour permettre le dépôt de toute la charge sédimentaire du cours d'eau, ni pleinement lotiques pour la laisser passer librement. En cela, nous retrouvons les caractéristiques des mouilles, hybridité intralotique où se déposent sédiments grossiers mais pas ceux fins.

Cette assertion est toutefois à prendre avec prudence. En effet, bien que le croisement des données de vitesse et épaisseur semble être assez parlant, nous pensons qu'il existe une autre possible lecture des données sédimentaires que nous avons collectées dans ces deux terrains d'étude, laquelle met en cause l'entretien des biefs. En effet, nous savons que pendant la deuxième guerre mondiale une bombe explosa dans le secteur situé à l'amont de la retenue de seuil de Baerenthal, formant une mouille artificielle que les hommes ont entretenue pendant plusieurs décennies. Les mesures que nous avons effectuées montrent que cet ancien cratère est recouvert par une épaisse couche de sédiments ; la question qui nous monte à l'esprit est alors la suivante : les opérations de manutentions du cratère pourraient-elles s'être étendue à la retenue de seuil avoisinante, créant des creux où les sédiments se déposent ? À cette question nous n'avons pas une réponse, mais un autre fait nous laisse imaginer que cette supposition a lieu d'être. Le propriétaire du terrain qui borde le secteur le plus envasé de la retenue de seuil de Saint-Hilaire nous a expliqué qu'il y a quelques décennies une pelleteuse avait commencé à entretenir cette partie du bief, mais les travaux ont dû s'arrêter à cause de la découverte de restes archéologiques. Cela voudrait-il dire que la couche de sédiments devrait être plus épaisse dans cette zone du terrain d'étude à cause de ce courage ? Encore une fois nous n'avons pas une réponse à cette question, qui reste au stade de la supposition et qui mériterait d'être approfondie dans une étude spécifique.

Pour conclure, dans ces deux terrains d'étude, nous avons un fonctionnement thermique, hydrodynamique et sédimentaire qui n'est pas pleinement lotique mais très éloigné du lenticque. Il s'agirait alors d'une hybridité intralotique se rapprochant des caractéristiques abiotiques d'une mouille. Mais qu'en est-il si les dimensions du seuil et de la retenue de seuil augmentent ?

1.2 Le fonctionnement de la retenue de seuil de Thévalles

Même à l'amont du grand seuil en rivière de Thévalles les résultats obtenus nous montrent qu'elle ne fonctionne pas comme un milieu lenticque, mais plutôt comme un milieu hybride. Toutefois, l'hybridation de ce site apparaît beaucoup plus remarquable et mieux

développée par rapport à celle qui se met en place dans les deux autres retenues de seuil étudiées au cours de cette recherche.

1.2.1 Une hybridité thermique ?

Dans cette retenue de seuil, la colonne d'eau alterne également des moments d'homogénéité et des moments d'hétérogénéité thermiques, qui ont lieu respectivement pendant les périodes les plus froides et les plus chaudes de l'année. Toutefois, contrairement à ceux-ci, les irrégularités estivales sont la norme et elles dépassent largement les moments d'uniformité thermique de la colonne d'eau. En outre, leur durée est beaucoup plus longue et leur intensité beaucoup plus importante, car ils peuvent durer jusqu'à plusieurs jours d'affilée et présenter des différences thermiques entre la surface et le fond de la colonne d'eau de l'ordre de plusieurs degrés Celsius. On peut classer ces périodes comme des stratifications thermiques, semblables à celles qu'on retrouve dans certains types de plans d'eau, notamment ceux polymictiques. La présence de stratifications thermiques au sein de la colonne d'eau est confirmée par l'analyse des cycles thermiques journaliers, qui sont considérablement différents en surface et en profondeur, les températures maximales et les amplitudes thermiques étant, dans le premier cas, plus importantes qu'aux étages inférieurs de la colonne d'eau. Néanmoins, il est nécessaire de souligner que le fonctionnement thermique global de la retenue de seuil n'est pas identique à celui d'un étang. En effet, si on compare les stratifications thermiques de la retenue de seuil de Thévalles avec celles de l'étang de Baerenthal on remarque, par exemple, que leur stabilité est très différente : bien qu'à l'amont du seuil en rivière du moulin aient été observés plusieurs cycles de 24 heures de stratification thermique, ces moments d'hétérogénéité restent minoritaires. De même, ils se concentrent au cours d'une période précise de l'année, alors qu'à Baerenthal on les retrouve en toutes saisons.

Grâce aux données collectées par la station météo positionnée à proximité de ce terrain d'étude, nous avons la confirmation du rôle déterminant joué par la température atmosphérique et le débit, qui déterminent les états thermiques de la colonne d'eau de ces environnements. Pour ce qui concerne les autres facteurs climatiques, aucun d'entre eux ne semblerait entrer en jeu dans le fonctionnement thermique de cette retenue de seuil : ce fait est particulièrement important car dans les milieux lenticules, les stratifications thermiques sont contrôlées par la radiation solaire, alors que l'influence de la température de l'air sur ce phénomène est moins importante (Wetzel, 1983). Cela expliquerait également pourquoi le fonctionnement thermique observé à l'amont et à l'aval de ce terrain d'étude est globalement le même, alors que le premier

secteur est moins exposé à la radiation solaire que le deuxième. Certaines études réalisées en Australie sur le fonctionnement thermique des retenues de seuil (*e.g.* Bormans et al., 1997; Webster et al., 1997) étaient arrivées à des conclusions similaires pour ce qui concerne l'influence de ces forçages. De fait, sur le plan thermique, les retenues de seuil de plus grandes dimensions semblent s'éloigner davantage du fonctionnement lotique sans toutefois prendre in extenso les caractéristiques lenticques. Nous serions donc en présence réellement d'un hybride lotique-lenticque, penchant toutefois davantage par ses caractéristiques temporelles vers le lotique. Qu'en est-il sur le plan hydrodynamique ?

1.2.2 Une hybridité hydrodynamique ?

Bien que les aspects hydrodynamiques de la retenue de seuil de Thévalles n'aient pas été étudiés en détail comme dans celles de Saint-Hilaire et Baerenthal, nous supposons que dans la retenue de seuil de Thévalles les eaux empruntent aussi uniquement une direction longitudinale : la constante dérive du bateau que nous avons observée pendant les campagnes de mesure bathymétriques-sédimentaires et qui nous a obligée à déployer des systèmes d'ancrage en serait une démonstration. De même, nous pensons que les crues qui ont touché ce site au cours de la période d'étude aussi sont une parfaite démonstration du fonctionnement lotique de ce compartiment et de l'hybridation dans cette retenue de seuil. En effet, celle-ci est un environnement où pendant la période de hautes il y a des crues capables de déplacer des gros troncs d'arbre ou les bouées ancrées au fond et pendant la période de basses eaux il y a des stratifications thermiques fortes et durables.

Pour ce qui concerne les temps de séjour des eaux, le plus grand volume d'eau et le plus fort ralentissement de l'écoulement engendrés par ce type de seuil en rivière engendrent des valeurs assez longues de ce paramètre, qui peut attendre une durée quasi-journalière. Toutefois, le petit nombre des données collectées dans ce site à cause des pannes du FlowTracker 2 nous pousse à nuancer ce propos : en effet, il est vraisemblable qu'au cours des basses eaux, le temps de séjour à l'amont du seuil en rivière du moulin de Thévalles dépasse les 24 heures. De même, le croisement entre le temps de séjour des eaux et le fonctionnement thermique du seuil de Thévalles suggéreraient l'abaissement du seuil de 10 jours indiqué par Straskraba, et al. (1993) pour différencier les milieux qui développent un fonctionnement lenticque de ceux qui développent un fonctionnement lotique, seuil que nous avons utilisé dans le cadre de cette recherche. Les données thermiques collectées dans l'étang de Baerenthal et celles relatives à la saison estivale collectées à l'amont du moulin de Thévalles (mais aussi celles collectées au

cours des recherches de Touchart que nous avons mentionné tout au long de cet ouvrage) sembleraient indiquer que cette valeur est surestimée et qu'un laps de temps beaucoup plus court suffirait pour qu'un milieu développe des caractéristiques lentiques. À titre d'exemple, le temps de séjour des eaux à l'intérieur de l'étang de Baerenthal a été estimé à environ 3 jours (Choffel, 2019). Donc, même à l'amont d'un seuil en rivière de grandes dimensions, les caractéristiques du compartiment hydrodynamique sont plutôt lotiques, mais son niveau d'hybridation semble être plus intense, avec des temps de séjour des eaux plutôt longs. Quels sont les répercussions de ce type de fonctionnement sur les caractéristiques sédimentaires de ce type de retenue de seuil ?

1.2.3 Une hybridité sédimentaire ?

D'un point de vue sédimentaire, le fait le plus éloquent observé à l'amont du seuil en rivière du moulin de Thévalles est le manque d'une couche de sédiment qui recouvre le fond, alors que nous nous attendions à en observer une très épaisse et bien développée. Bien qu'il n'existe pas de données qui puissent le confirmer, nous supposons que cela puisse être attribué au fait que les campagnes de mesures bathymétriques-sédimentaires ont été exécutées après les trois crues successives qui ont intéressé ce terrain d'étude. Le propriétaire du site nous a fourni une autre lecture de ce fait, que nous considérons intéressante. Selon lui, le manque d'une couche de sédiments serait engendré par le fait que le moulin et ses annexes hydrauliques soient tous encore en état de marche et que les sédiments s'évacuent par la vanne de fond qui actionne la turbine quand celle-ci est actionnée. Comme preuve à cette théorie, il nous a montré des anciennes planches qui constituaient la roue de son moulin : elles apparaissent très endommagées, comme si elles avaient été exposées à des travaux de sablage, avec même des trous qui auraient été provoqués par des sédiments grossiers (fig. 92). En raison de ce phénomène, cet élément de la turbine doit être substitué environ tous les trois ans. Cet élément est très important concernant les réflexions autour de la gestion des retenues de seuil. En effet, la présence ou l'absence d'une vanne de fond au niveau des seuils transforme considérablement la nature abiotique de la retenue en amont : d'hybride intralotique tendant vers le lotique, elle deviendrait pleinement lotique.



Figure 92 : L'état d'une ancienne planche de la roue du moulin de Thévalles (Photo réalisée par Francesco Donati).

Ce fait présenté dans le cadre du moulin de Thévalles symbolisant des seuils importants (2 m de hauteur), toucherait sans doute également les retenues de plus petites dimensions. Cette hypothèse irait dans le sens d'une remise en état des vannes de fond de seuils de moulins si l'objectif recherché était bien celui d'une continuité lotique des cours d'eau, mais ceci est un autre débat. Nous allons donc synthétiser les analyses faites sur ces trois retenues de seuil pour déterminer les éléments tangibles généraux et particuliers des retenues de seuil dans le contexte de la France métropolitaine.

1.3 La nature des retenues de seuil et les phénomènes qui la déterminent

Sur la base de ces considérations, nous pouvons donc essayer de répondre à la question qui anime ce travail de recherche : les seuils en rivière transforment-ils les milieux lotiques en milieux lenticques, créant des retenues de seuil qui fonctionnent comme des plans d'eau ? À cette question nous donnons une réponse négative, car les observations réalisées dans les différents terrains d'étude montrent que la nature de ces ouvrages environnements est très différente de celle des plans d'eau. Toutefois, il est à notre avis indéniable que quelque chose se passe dans les retenues de seuil, que les ouvrages qui les forment imposent un changement, bien que moindre, à la nature des cours d'eau qu'ils entravent, qui dans certaines conditions peuvent effectivement présenter des traits se rapprochant de caractéristiques lenticques. Pour

cette raison, nous affirmons que la nature des retenues de seuil n'est ni lotique, ni lentique, mais hybride. En effet :

- Leur fonctionnement thermique présente des traits typiquement lotiques pendant la plupart de l'année, avec une colonne d'eau et des cycles thermiques uniformes à tous les niveaux de la colonne d'eau. Toutefois, celle-ci peut être concernée par des stratifications thermiques plus ou moins intenses et durables comme dans les milieux lentiques, notamment au cours des mois les plus chauds de l'année et à l'amont de ouvrages plus grandes. Cependant, la structuration thermique de la colonne d'eau ne semblerait pas être engendrée par la radiation solaire, comme c'est le cas dans les plans d'eau, mais plutôt par la température atmosphérique.
- Leur fonctionnement hydrodynamique présente des traits éminemment lotiques, avec des flux d'eau qui empruntent uniquement la direction amont-aval et des temps de séjour des eaux relativement faibles. Toutefois, le « trébuchement » que le seuil en rivière fait connaître à l'écoulement fluvial provoque des phénomènes hydrodynamiques caractérisés par une faible énergie, similaires à ceux qu'on observe dans ces espaces qui sont déjà considérés par la littérature scientifique comme des environnements hybrides, les mouilles.
- Leur fonctionnement sédimentaire semble favoriser la sédimentation de certains types de particules et la formation de zones de dépôts qui s'organisent selon un gradient granulométrique amont-aval, comme dans les plans d'eau artificiels. Toutefois, bien qu'on assiste à un changement de son intensité, la compétence de l'écoulement est telle qu'elle peut toujours évacuer au moins la charge sédimentaire en suspension et les zones de dépôts mentionnées plus haut ne sont pas définitives, mais elles évoluent en fonction des crues, comme dans les milieux lotiques.

Un autre élément que les données font apparaître de manière remarquable est le fait que le niveau d'hybridation que les seuils en rivière imposent au cours d'eau est modéré, voire faible, à l'amont des ouvrages de taille faible et moyenne et qu'il s'accroît à l'amont de celles plus grandes. Nous pouvons alors essayer de comprendre, quelles sont les causes qui engendrent cette diversité. Nous en avons identifié trois possibles, qu'il convient de discuter : le temps de séjour des eaux, la profondeur et le volume et la forme de la retenue de seuil.

1.3.1 Le temps de séjours des eaux

Comme nous l'avons expliqué au cours de la première partie de cette recherche, le temps de séjours des eaux joue un rôle important dans la détermination de la lenticité d'un milieu aquatique. Nous pensons que cela est vrai aussi pour ce qui concerne les retenues de seuil et que les divers niveaux d'hybridation des terrains d'étude que nous avons examinés soient explicable, en grande partie, à travers ce paramètre. En effet, si par exemple nous le comparons avec le fonctionnement thermique des retenues de seuil que nous avons étudiées, nous remarquons que des stratifications thermiques se mettent en place uniquement là où le temps de séjour des eaux a une durée assez longue, similaire à celle d'un petit étang, c'est-à-dire à l'amont du moulin de Thévalles. Nous pensons que cette considération sert aussi pour confirmer ultérieurement l'important rôle de l'écoulement dans le fonctionnement des retenues de seuil. En effet, les stratifications thermiques que nous avons observées se forment uniquement pendant l'été, quand les débits du tributaire sont les plus faibles et, théoriquement, les temps de séjours des eaux deviennent plus longs.

1.3.2 La profondeur et le volume

Qui dit temps de séjours des eaux, dit volume et profondeur et nous pensons que ces paramètres aussi jouent un important rôle dans le différent niveau d'hybridation des retenues de seuil que nous avons étudiées. En effet, comme nous l'avons vu au cours de la deuxième partie de recherche, entre les différents terrains d'étude existe une sorte de gradient de ces deux paramètres, qui va de pair avec la hauteur du seuil en rivière qui les forme : à Saint-Hilaire et Baerenthal nous avons des faibles hauteurs d'ouvrages et des faibles profondeurs et volumes d'eau, alors que à Thévalles nous avons un grand seuil et une profondeur et volume plus importants. Si, encore une fois, nous prenons comme référence le fonctionnement thermique de ces sites, on remarque qu'au fur et à mesure ces variables augmentent, plus intenses et durables deviennent les stratifications thermiques qui se forment au sein de la colonne d'eau. Nous pouvons donc supposer que majeures sont la profondeur et le volume de la retenue de seuil, plus fort sera son niveau d'hybridation.

Ces considérations nous ont amené à nous interroger sur l'influence d'autres paramètres morphologiques qui sont généralement mentionnés quand on parle de lenticité, mais nos réflexions n'ont pas abouti à des conclusions convaincantes. Un d'entre eux est le coefficient de domination, qui, comme Meybeck (1995) l'explique, exprime le rapport entre la surface du

bassin versant d'un plans d'eau et celle de sa cuvette. Il permet de classer les plans d'eau en rangs : dans ceux supérieurs à 5-6 on retrouve les plans d'eau dominés par leur bassin versant et, du moins si on veut le dire différemment de la manière dont l'exprime cet auteur, « moins lenticques », alors que dans ceux inférieurs à 5-6 on retrouve les plans d'eau indépendants de leur bassin versant et « plus lenticques ». L'analyse de ce paramètre pour ce qui concerne nos terrains d'étude nous montre qu'effectivement il existe des différences de cette variable entre les trois sites, mais aussi que tous sont absolument dominés par leur bassin versant, le coefficient de domination étant égal à 50084 pour Saint-Hilaire, 27555 pour Baerenthal (460 pour l'étang de Baerenthal) et 10096 pour Thévalles.

1.3.3 La forme de la retenue de seuil

Nous pensons que même la forme de la retenue de seuil joue un rôle important, déterminant l'ascendant du tributaire sur son fonctionnement hybride. En effet, les seuils en rivière n'engendrant pas le débordement des eaux dans le lit majeur, la forme d'une retenue de seuil coïncide avec celle du chenal du cours d'eau qui l'alimente. Cette morphologie est sans doute propice à canaliser l'énergie restant au tributaire après le ralentissement qu'il subit, lui permettant, en exemple, de brasser par entier la colonne d'eau pendant la plupart du temps de l'année. Au contraire, pendant la période des basses eaux, quand son énergie est déjà naturellement faible, celle-ci ne serait pas suffisante pour homogénéiser la colonne d'eau d'une retenue de seuil profonde, qui pour cette raison se stratifie.

L'ensemble de considérations que nous avons réalisées au cours de ce chapitre nous aident à bien définir les principaux traits du fonctionnement abiotique des trois retenues de seuil que nous avons étudiées au cours de cette recherche. Sur ces bases, nous pouvons maintenant passer du particulier au général, en essayant de décliner les caractéristiques et la nature de toute retenue de seuil.

2. LES RETENUES DE SEUIL : DES ÉCOTONES ANTHROPIQUES

Au cours de la première partie de cette recherche, nous avons vu que dans la nature l'hybridité va de pair avec les écotones. Sur la base de cette considération, nous nous sommes donc posé la question suivante : les retenues de seuil peuvent-elles aussi être considérées comme des écotones ?

2.1 Des écotones artificiels le long de la quatrième dimension des hydrosystèmes

La première objection qu'on pourrait faire à cette question est qu'elle semble contredire l'essence même des écotones, c'est-à-dire le fait de se former aux marges de deux milieux naturels distincts, ce qui n'est pas le cas pour les retenues de seuil, l'élément qui les forme étant artificiel de création. Toutefois, si au cours de la première partie de cette thèse nous avons abordé les écotones qui se développent le long des axes longitudinaux, transversaux et verticaux des hydrosystèmes, ce panorama de milieux hybrides ne serait pas complet si nous négligions leur quatrième dimension : le temps. Dans notre cas spécifique, celle-ci ne se traduit pas par les bouleversements qu'un hydrosystème connaît au cours des ères géologiques, mais plutôt par la grande influence que les humains ont sur ces espaces, laquelle a profondément modifié leur aspect et fonctionnement, comme c'est le cas pour les fleuves et les rivières du continent européen depuis des siècles.

2.1.1 *La colonisation humaine des hydrosystèmes*

Pour comprendre jusqu'à quel point l'action de l'homme sur les paysages fluviaux européens est importante et ancienne, les études archéologiques et géoarchéologiques consacrées à ces milieux nous viennent en aide. Selon Brown et al. (2018), les cours d'eau de « l'ancien continent » auraient évolué au cours des millénaires, empruntant quatre trajectoires paysagères différentes :

1. Au cours de l'Holocène, quand l'influence de l'homme sur l'environnement était quasiment nulle, la principale caractéristique des bassins versants européens était leur dense couverture forestière. Cette grande abondance de végétation influençait considérablement la dynamique des cours d'eau, qui globalement se présentaient avec des chenaux anastomosés.
2. À partir de l'Âge du Bronze, à la suite de l'apparition et la successive radicalisation de certaines pratiques humaines comme l'agriculture, les vastes forêts qui s'étalaient

dans les bassins versants sont graduellement abattues. Cela a un impact sur la dynamique sédimentaire des cours d'eau, qui petit à petit abandonnent leur morphologie à chenaux multiples, la remplaçant par un chenal unique.

3. À l'époque romaine, l'influence de l'homme est évidente dans les plaines d'inondation, lesquelles sont massivement assainies pour transformer les nombreuses zones humides qui les caractérisent en terrains agricoles ou pâturages.
4. À partir du Moyen-âge, des systèmes de gouvernance des territoires de plus en plus sophistiqués, ainsi que des technologies plus performantes, transforment les cours d'eau en des véritables centres de pouvoir et économiques, qui doivent être entretenus et protégés pour garantir l'efficacité des installations hydrauliques.

Ces trajectoires paysagères générales, on les retrouve également à l'échelle locale. De la France métropolitaine arrivent un grand nombre d'exemples à ce sujet, grâce à des recherches géoarchéologiques particulièrement attentives dans l'analyser l'évolution temporelle des hydrosystèmes (Salvador et al., 2009). Bravard et al. (2008), reconstituant les paléoenvironnements de la vallée du Rhône, montrant comme le tracé de ce grand fleuve a évolué sous l'influence de facteurs climatiques, mais aussi anthropiques, comme les nombreux travaux hydrauliques réalisés au fil du temps dans son bassin versant. L'influence de l'homme sur les paysages rhodaniens est très ancienne, comme le démontrent certains travaux qui ont démontré l'existence de plusieurs villages d'époque gallo-romaine installés directement dans la plaine d'inondation de ce cours d'eau et de ses affluents, dans des endroits relativement protégés des exondations, autour desquels s'étaient développées des florissantes activités agricoles (Salvador et al., 2009). En France métropolitaine, les travaux archéologiques ont également démontré l'ancienneté de certains ouvrages hydrauliques, dont un parfait exemple est l'ancienne digue d'étang d'époque gallo-romaine, qui barrait le tracé de l'Aigre dans l'ancienne ville de Verdes, à quelques kilomètres à l'ouest de la ville d'Orléans (Jalmain, 1999). À partir du Moyen-âge, les paysages fluviaux français commencent à être massivement équipés de moulins à eaux et de toutes les annexes hydrauliques nécessaires à leur fonctionnement (seuils en rivière, chenaux de dérivation, etc.). Comme plusieurs études l'ont démontré (*e.g.* Champion, 1996; Langdon & Langdon, 2004; Pichot, 2002), déjà pendant le haut Moyen-âge, nombreuses étaient les rivières remplies de ces constructions, comme celles de la France occidentale. En effet, comme Barraud et al. (2013) l'expliquent, les densités de moulins à eau dans les cours d'eau dans cette partie de la France sont parmi les plus importantes de toute l'Europe : moyennement, on retrouve un moulin par kilomètre, valeur qui dans

certaines rivières particulièrement favorables à l'installation de ces constructions peut atteindre les trois moulins par kilomètre, comme c'est le cas sur la Sèvre nantaise ou sur le Thouet. Ces phases de colonisation anciennes ont été suivies par d'autres plus récentes et à ce sujet plusieurs exemples peuvent être apportés. L'un d'entre eux est celui des transformations paysagères que la plaine du Rhône a connu entre le XIX^{ème} et XX^{ème} siècle et qui ont été décrites par Baud et al. (2015). Elles ont amené à l'endiguement massif du fleuve pour protéger les populations qui habitent sa vallée, l'assèchement d'un grand nombre de zones humides pour la création d'espaces agricoles ou la création de nouvelles installations ou infrastructures urbaines.

2.1.2 L'hybridité des hydrosystèmes contemporains

Les quelques jalons de l'histoire des hydrosystèmes que nous venons de retracer succinctement nous autorisent à nuancer quelque peu l'idée de rivière sauvage très à la mode aujourd'hui au sein des gestionnaires de l'eau et de certains groupes écologistes (Barraud, 2011 ; Zaharia et al., 2018). Cette nuance pourrait être élargie à la quasi-totalité des milieux de la Terre, qui subissent désormais l'influence plus ou moins directe de l'homme. Ce fait est bien connu au sein des Sciences environnementales, qui petit à petit en ont pris conscience, formulant au cours des dernières décennies plusieurs théories qui essaient d'expliquer ce phénomène. La plus ancienne est celle du « géosystème », défini par Bertrand (1968) comme un espace à l'intérieur duquel interfèrent des éléments d'origine anthropique et naturelle et où l'homme est le moteur des dynamiques environnementales qui le caractérisent²⁸. Entre la fin du XX^{ème} et le début du XXI^{ème} siècle, Berkes & Folke (1998) et Berkes et al. (2003) créent la notion de « socio-écosystème », qui explique l'influence de l'homme sur le fonctionnement des écosystèmes. Quasi simultanément, Lévêque et al. (2003) inventent le concept « d'Anthroposystème », défini comme : « *un système complexe, hybride et interactif entre deux ensembles organisés constitués par un sociosystème et un écosystème, plus ou moins artificialisé* ». Selon ces auteurs, le niveau d'hybridation de ce type de milieu augmente en fonction du degré d'altération qu'ils ont subi :

²⁸Cette définition de géosystème est un peu différente de la signification russe à l'origine du terme. En effet, comme Touchart & Bartout (2018) l'expliquent, à l'origine du mot il y a le géographe russe Viktor Sotchava, qui définit cette notion comme : « *une unité territoriale dont l'identité est déterminée par une étude quantifiée des flux et des masses, si bien qu'il réclame une approche qui ne comporte pas d'a priori dans la hiérarchie des interrelations, ni en faveur de la biocénose, ni en faveur du biotope* ».

- Si les modifications sont moindres, alors l’anthroposystème s’organise auprès « *d’une succession de fluctuations autour d’un ensemble d’états proches qui, tout en maintenant la structure organisationnelle du système, assurent son fonctionnement et sa pérennité dans le changement* ».
- Si au contraire les modifications sont inébranlables, alors l’anthroposystème « *s’adapte en changeant tout ou partie de son organisation et de son fonctionnement pour s’ajuster à de nouvelles conditions* ».

Ces trois théories s’adaptent parfaitement aux hydrosystèmes contemporains, comme l’expliquent Lespez & Dufour (2020, 2021) quand ils affirment que aujourd’hui : « *Les rivières sont des organismes hybrides animés par des flux qui obéissent à des lois physiques ou biologiques, mais dont la matérialité, l’agencement et les conditions de fonctionnement sont déterminés depuis plusieurs millénaires par les sociétés et leurs activités* ». En d’autres termes, les hommes ont façonné les cours d’eau selon leurs besoins, bouleversant leur fonctionnement naturel et « inventant » des nouveaux environnements, qui petit à petit se sont intégrés au fonctionnement de ces espaces.

2.1.3 Les retenues de seuil comme des écotones artificiels

Hobbs et al. (2006) définissent ces espaces d’origine anthropique des « nouveaux écosystèmes », c’est-à-dire des environnements qui se forment au centre du gradient entre un milieu naturel et un anthropique. Ils présentent deux caractéristiques principales :

- Le fait de présenter des nouveaux traits par rapport à un écosystème historique, comme une nouvelle composition d’espèces et/ou des nouvelles fonctionnalités.
- Le fait d’avoir été créés délibérément par l’homme et de présenter un fonctionnement qui ne nécessite pas d’aucune intervention humaine.

Hobbs et al. (2009) affinent cette idée, faisant la distinction entre les « écosystèmes hybrides » et les « nouveaux écosystèmes ». Les premiers se forment quand le gradient mentionné plus haut est en équilibre, faisant en sorte qu’ils présentent un fonctionnement qui diffère du milieu naturel originel, tout en conservant une grande partie des caractéristiques de celui-ci. Les deuxièmes se forment quand le gradient mentionné *supra* n’est pas en équilibre, c’est-à-dire que les pressions d’origines anthropiques sont importantes, faisant en sorte qu’ils présentent un fonctionnement complètement différent du milieu naturel originel.

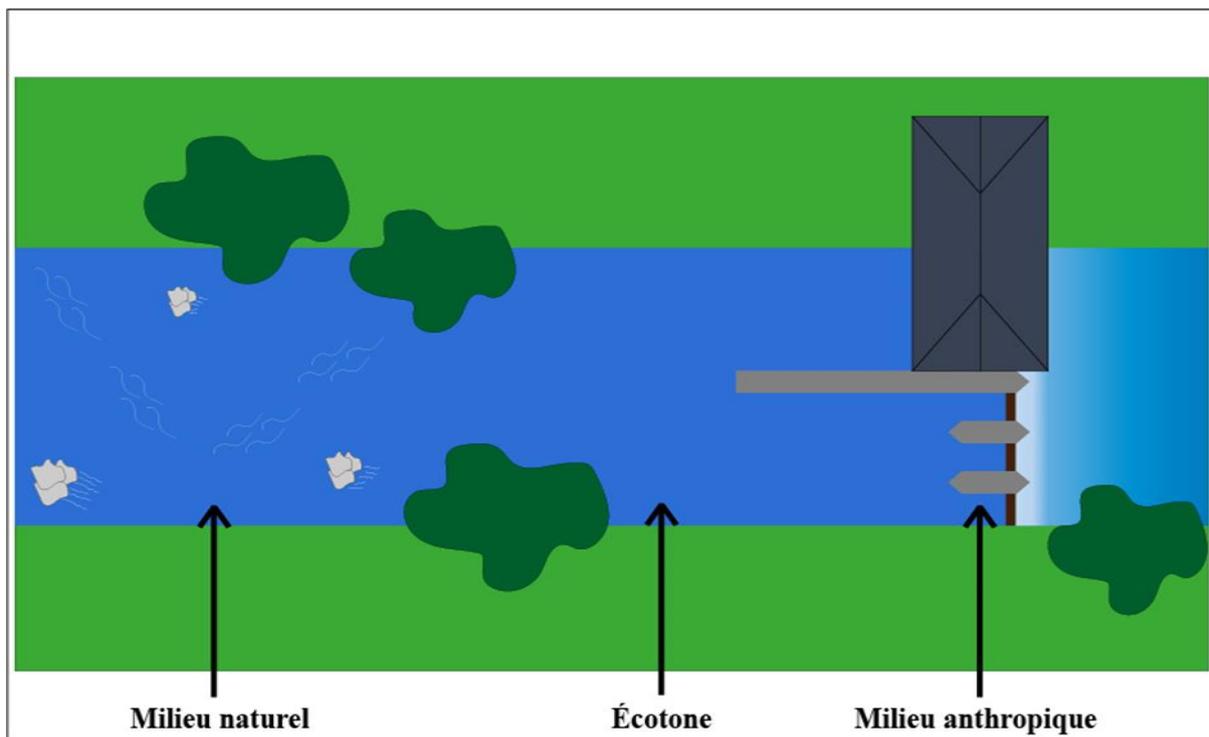


Figure 93 : L'écotone retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati).

Ces concepts nous renvoient à la notion d'écotone et aux retenues de seuil. Selon nous, dans la nature d'aujourd'hui profondément bouleversée par l'homme, il existerait deux types d'écotones : ceux qui se forment sur les marges de deux milieux naturels homogènes, mais aussi ceux qui s'interposent entre les milieux naturels et ceux anthropiques. Comme leurs homologues « naturels », ces derniers sont gouvernés par un gradient environnemental, dont les caractéristiques sont en partie déterminées par l'action de l'homme et pas seulement par la fluctuation des forçages naturels²⁹. Quand l'influence anthropique est forte, l'écotone qui se forme présente des caractéristiques bien définies, présentant les traits d'un véritable nouvel écosystème. En revanche, quand l'influence anthropique est faible, l'écotone qui se forme présente des traits moins marqués, présentant les traits d'un écosystème hybride. Ainsi, en nous appuyant sur la figure 19 précédente, il serait sans doute nécessaire d'ajouter une quatrième catégorie d'écotones, qui comprendrait les espaces dérivant de la modification humaine de la nature. Les retenues de seuil rentreraient dans ce groupe : en effet, elles se situent entre un milieu naturel (un cours d'eau) et un artificiel (le seuil) et leur fonctionnement est déterminé

²⁹ À une conclusion similaire était arrivée Bruhier (1998), dans sa thèse intitulée « Transformation des paysages et dynamiques de la biodiversité végétale. Les écotones, un concept clé pour l'étude des végétations post-culturelles. L'exemple de la commune d'Aussois (Savoie) ». En effet, elle explique comment certaines pratiques culturelles humaines, très répandues dans les paysages montagnards, amènent à la formation d'environnements particuliers, qui présentent des caractéristiques d'écotone.

par un gradient de phénomènes d'origines naturelles et anthropiques (fig.93). Cette condition concerne d'autres environnements aquatiques d'origine artificielle, dont certains d'entre eux touchent de près à la Limnologie : il s'agit des étangs et de lacs de barrage. Est-ce que cela signifie que l'idée selon laquelle les seuils en rivière exerceraient à leur amont le même type d'effet des barrages ou de chaussées d'étang est-elle fondée ? Sur la base des éléments que nous avons abordés jusqu'à ce point, nous pouvons essayer de comprendre si cette idée correspond à la réalité et de saisir comment les retenues de seuil se placent au sein des autres milieux lentiques, naturels et artificiels.

2.2 L'écotone retenue de seuil et sa place au sein des milieux aquatiques continentaux

Effectivement, la notion d'écotone artificiel que nous venons de formuler semble être adaptée aussi pour les lacs de barrage et les étangs, en raison des caractéristiques hybrides qu'ils présentent. Certaines d'entre elles nous les avons abordées au cours de la première partie de cette recherche, à titre d'exemple quand nous avons expliqué que dans la littérature limnologique on subdivise la cuvette de ces retenues en une zone lotique, une zone de transition et une zone lentique. Nous ne reprendrons pas dans le détail le fonctionnement de ces plans d'eau artificiels, mais en soutien de notre affirmation nous rapportons cette phrase du célèbre limnologue Wetzel (1990), qui à propos des (grandes) retenues écrit : « *A reservoir can be viewed as a very dynamic lake in which a significant portion of its volume possesses characteristics of and functions biologically as a river*³⁰ ». Toutefois, en raison des résultats obtenus dans les retenues de seuil que nous avons étudié et notamment en raison de la comparaison retenue de seuil-étang de Baerenthal, il nous semble clair que ces trois milieux artificiels ne partagent pas le même type de fonctionnement : certes, tous les trois ajoutent de traits stagnants aux eaux courantes, mais pas de la même manière, pas avec la même intensité. Pour comprendre cela, nous pouvons alors essayer de disposer les uns après les autres ces trois types d'écotones artificiels, du plus lotique au plus lentique, délinéant les traits principaux de leur fonctionnement.

³⁰ Cette phrase peut être traduite de la manière suivante : « Une retenue peut être considérée comme un lac très dynamique dans lequel une partie importante de son volume présente des caractéristiques et un fonctionnement biologique d'un cours d'eau ».

2.2.1 Le fonctionnement de l'écotone retenue de seuil : le plus bas échelon de lenticité

Le plus faible niveau de lenticité est occupé par les retenues de seuil. Ici, le gradient environnemental qui sépare le milieu naturel et celui anthropique se manifeste à travers le rehaussement de la ligne d'eau et le ralentissement du courant provoqués par le seuil, qui confère à ces environnements le fonctionnement hybride que nous avons mis en lumière dans les pages précédentes. Dorénavant, nous désignerons ce type de fonctionnement avec le mot « paralotique », où le suffixe « para » souligne le fait qu'il n'est pas complètement lotique. Cela dit, nous pensons qu'il convient de différencier les retenues de seuil formées par un seuil en rivière « fixe » et celles formées par un seuil en rivière équipé d'éléments mobiles, car le gradient qui détermine leur fonctionnement évolue de manière différente. Nous commencerons par les premiers, c'est-à-dire par les retenues de seuil engendrées par des ouvrages similaires à celui qu'on retrouve dans le terrain d'étude de Baerenthal. Comme dans tout écotone, même le gradient environnemental retenues de seuil évolue en fonction des fluctuations d'un forçage, à l'instar de la salinité à la salinité des estuaires ou de la vitesse de l'écoulement dans les mouilles. Dans le cas des espaces qui se forment à l'amont d'un ouvrage fixe, la principale force qui engendre ces variations est le débit du tributaire, qui peut être considéré comme le véritable moteur du fonctionnement abiotique de ce type d'environnement. En effet, dans ce cas, l'homme ne peut plus intervenir sur le gradient environnemental qu'il a créé, lequel est à la merci des éléments naturels, un seuil en rivière fixe n'offrant pas aucune marge de manœuvre anthropique. Ainsi, pendant les hautes eaux, quand les eaux du tributaire sont abondantes et présentent une forte énergie, le fonctionnement paralotique de la retenue de seuil devient plus lotique, les débits importants effaçant les effets du seuil en rivière, qui au cours d'une crue peut même devenir « transparent ». En revanche, au cours des basses eaux, quand les eaux du tributaire ne sont pas abondantes et ne présentent pas une forte énergie, le fonctionnement s'éloigne des caractéristiques abiotiques lotiques pour en épouser certaines plus lenticques, les débits peu importants accentuant les effets du seuil en rivière. Au cours de ces fluctuations hydrodynamiques que nous venons de décrire varient également tous les autres compartiments abiotiques qui constituent le fonctionnement paralotique d'une retenue de seuil formées par un ouvrage fixe. D'un point de vue sédimentaire, nous avons vu comment l'effet d'un seuil en rivière se traduit par une modification de la compétence du tributaire qui alimente la retenue de seuil, une caractéristique qui renvoie à la possibilité des écotones de modifier le transit des matières et énergie. Quand le gradient environnemental est en équilibre, le cours d'eau, sous l'effet de l'ouvrage transversal, perd soudainement une fraction plus ou moins importante de

son énergie, entraînant la sédimentation d'une portion de la charge sédimentaire qu'il transporte, alimentant une couche de sédiments qui recouvre les fonds. Au cours des basses eaux, quand le fonctionnement de la retenue de seuil devient plus lentique, nous pouvons supposer que cet effet sur la compétence du tributaire s'accroît et que celui-ci perd une portion encore plus importante des particules qu'il transporte. Au contraire, au cours des hautes eaux, quand le fonctionnement de la retenue de seuil devient plus lotique, nous pouvons imaginer que l'ouvrage ne joue quasiment aucun effet sur la compétence et que, pendant les crues, une fraction des sédiments qui s'étaient accumulés précédemment sont mobilisés et évacués à l'aval. D'un point de vue thermique, nous avons vu comment l'effet d'un seuil en rivière peut se traduire par l'apparition de stratifications thermiques au sein de la colonne d'eau. Les résultats que nous avons obtenus sur le terrain semblent montrer que la possibilité que ce phénomène se mette en place sont strictement corrélées à la hauteur de l'ouvrage et par conséquent au volume d'eau que celui-ci ralentit. En d'autres termes, nous pouvons imaginer que quand les dimensions d'un seuil en rivière et le volume d'eau stocké à son amont sont faibles, alors le tributaire peut toujours brasser entièrement la colonne d'eau de la retenue de seuil, empêchant la formation de strates d'eau distinctes : c'est le cas d'un ouvrage qui présente des dimensions similaires à celles de Saint-Hilaire, même si ce dernier n'est pas un seuil en rivière fixe. Au fur et à mesure que la taille du seuil en rivière et le volume d'eau stockés à son amont sont augmentés, le brassage de la colonne d'eau effectué par le tributaire devient de moins en moins efficace, notamment pendant les basses eaux, quand la faible énergie des eaux réduit ultérieurement son efficacité : c'est le cas d'un ouvrage aux dimensions similaires à celui de Thévalles, même si encore une fois il ne s'agit pas un seuil en rivière fixe. Pour mieux clarifier les concepts que nous venons d'illustrer, nous proposons la figure 94, qui résume le fonctionnement d'une retenue de seuil formée par un seuil en rivière fixe au fil des saisons.

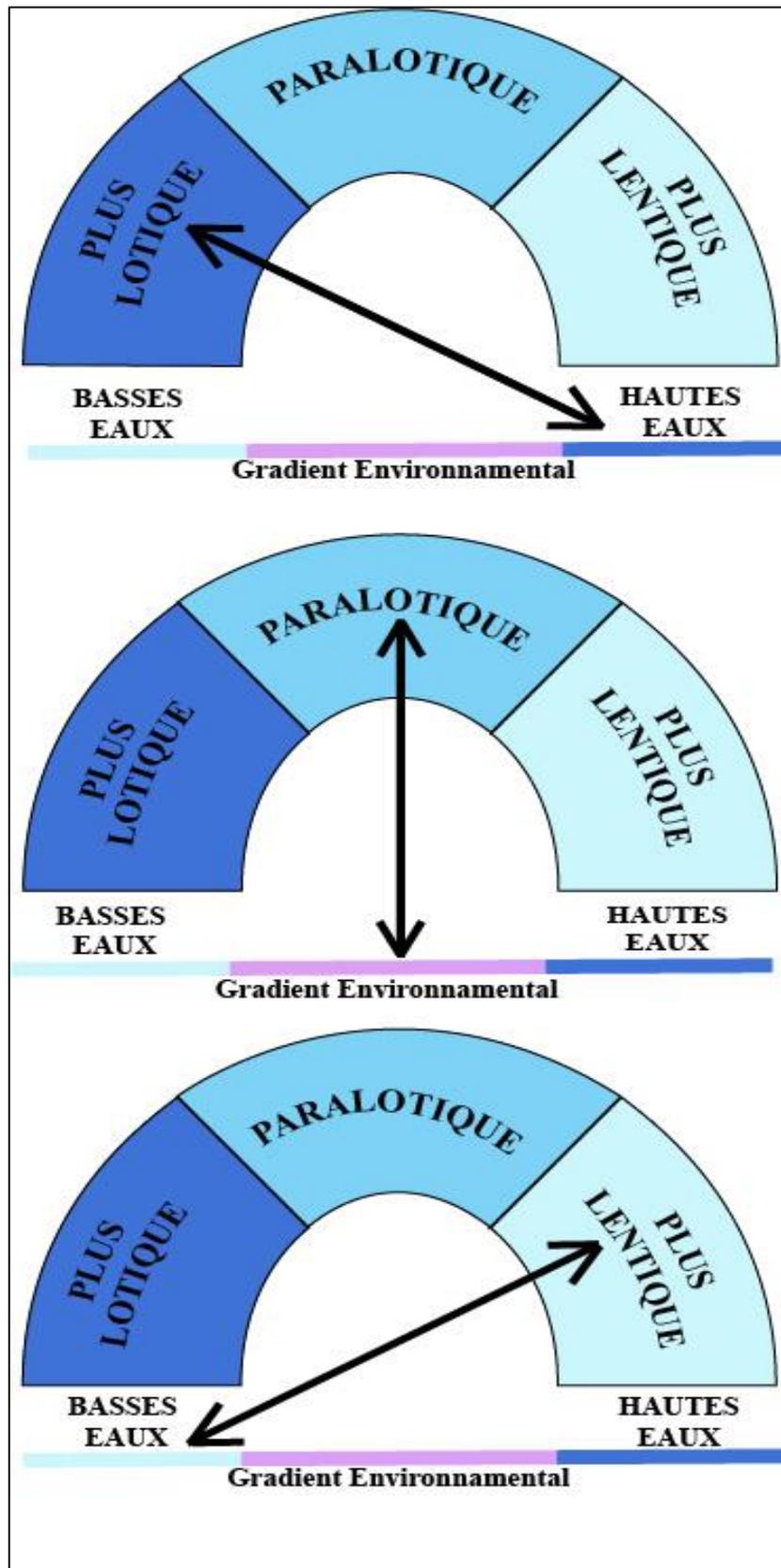


Figure 94 : Le fonctionnement d'un écotone retenu de seuil formée par un seuil en rivière fixe (Réalisation : Francesco Donati).

Le deuxième type de retenue de seuil est formé par des ouvrages similaires à ceux qu'on retrouve dans les terrains d'étude de Saint-Hilaire ou Thévalles, c'est-à-dire par des seuils en rivière dotés de vannes ou tout autre élément mobile (en état de marche). Dans ce cas aussi le gradient environnemental qui sépare le milieu naturel et celui anthropique se manifeste à travers le rehaussement de la ligne d'eau et le ralentissement du courant engendrés par le seuil. Comme pour les espaces situés à l'amont de seuils en rivière fixes, même dans ce type de retenue de seuil, le gradient environnemental fluctue saisonnièrement suivant les variations du débit du tributaire, mais à ce forçage naturel il faut en ajouter un autre anthropique. En effet, comme nous l'avons expliqué au cours de la deuxième partie de ce manuscrit, les vannages contrôlent l'hydrologie du bief qui se forme à l'amont de l'ouvrage, afin de pouvoir l'entretenir ou régler la vitesse de la roue hydraulique : manipulant l'élément mobile, les hommes peuvent donc intervenir directement sur le gradient environnemental qui caractérise la retenue de seuil. À titre d'exemple, si les vannes sont complètement ouvertes, alors le volume d'eau contenu dans la retenue de seuil diminue et la vitesse des eaux accélérée, faisant basculer le fonctionnement paralotique de la retenue de seuil vers un état plus lotique. Au contraire, si les vannes sont complètement fermées, alors le volume d'eau contenu dans la retenue de seuil augmente et la vitesse des eaux diminue, faisant basculer le fonctionnement paralotique de la retenue de seuil vers un état plus lentique. Nous avons pu observer avec nos yeux cette évolution anthropique d'une retenue de seuil à Thévalles, quand après la crue qui avait coincé la chaîne de thermomètres dans les annexes hydrauliques du moulin, le propriétaire avait « vidé » le bief de l'ancienne usine, afin de faciliter les opérations de récupération. Quand elles sont manœuvrables, les vannes d'un seuil en rivière peuvent donc être exploitées pour gérer les retenues de seuil, conciliant les nécessités des gestionnaires et des propriétaires. C'est ce que fait l'organisme chargé de la gestion des moulins des Mauves, qui chaque année réalise des chasses hivernales dans les retenues de seuil. Pendant les hautes eaux, celles-ci sont ouvertes pour essayer d'évacuer les sédiments qui s'accumulent dans les retenues de seuil. Cela a même permis de trouver un nouvel usage aux anciens moulins, qui, grâce à la possibilité de faire fonctionner leurs éléments mobiles, sont utilisés pour tenter d'écarter des éventuelles inondations. En effet, lors d'une éventuelle crue, les vannes sont fermées pour réduire la quantité d'eau qui s'écoule à l'aval en stockant une partie du débit, les biefs étant vidés pour les chasses hivernales. Pour mieux clarifier les concepts que nous venons d'illustrer, nous proposons la figure 95, qui résume le fonctionnement d'une retenue de seuil formée par un seuil en rivière équipé d'éléments mobiles au fil des saisons.

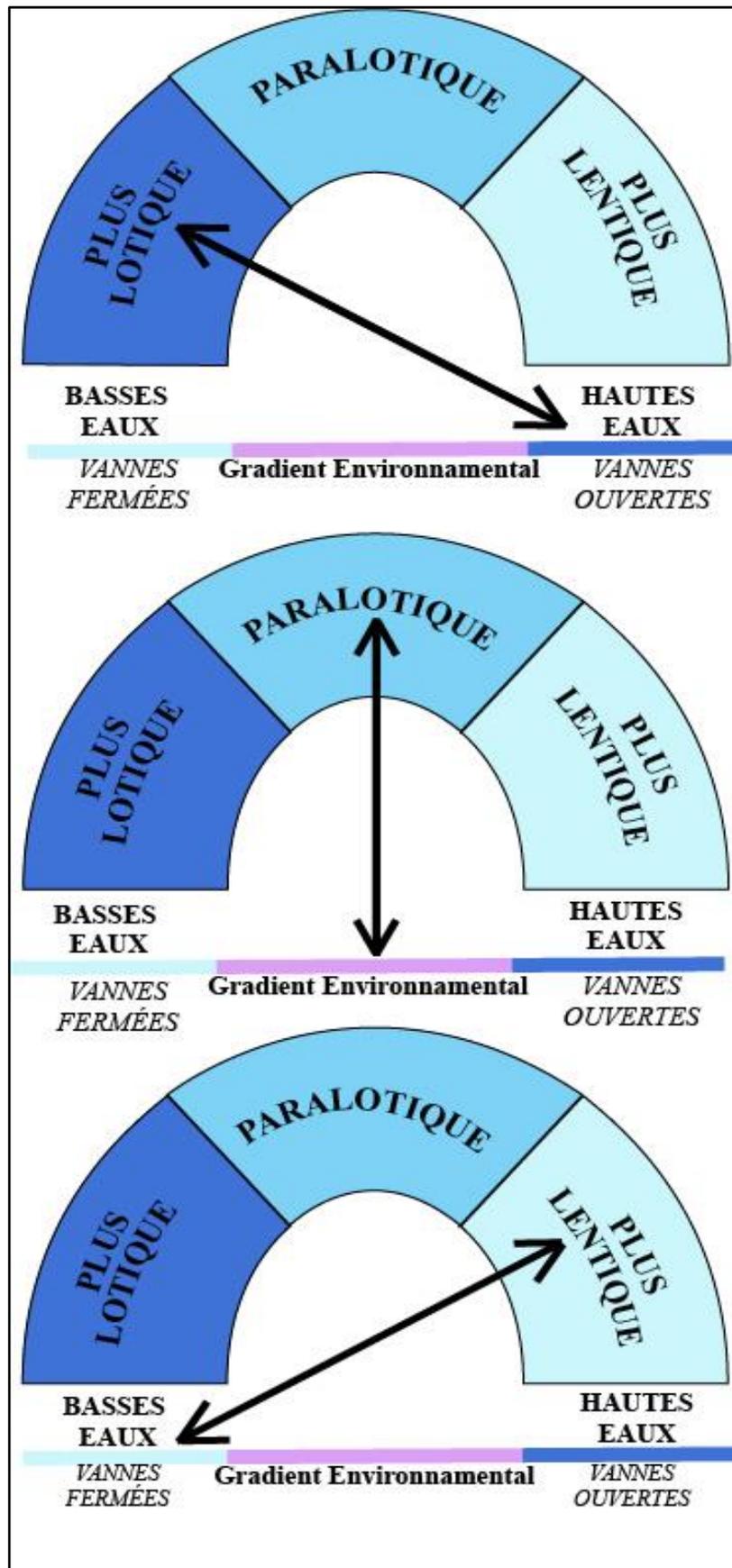


Figure 95 : Le fonctionnement d'un écotone retenu de seuil formée par un seuil en rivière équipé d'éléments mobiles (Réalisation : Francesco Donati).

Pour ce qui concerne les retenues de seuil, une ultérieure distinction peut être réalisée, distinguant entre celles polymictiques continues et celles polymictiques discontinues, une terminologie que nous reprenons de la classification des plans d'eau établie par Lewis (1983). Dans le premier type de retenue de seuil, les caractéristiques lenticques sont extrêmement faibles, quasi imperceptibles et elles peuvent se manifester, par exemple, à travers un léger changement de la compétence de l'écoulement ou quelques rares et courtes différences de température entre la surface et le fond de la colonne d'eau. C'est notamment le cas des retenues de seuil formées par des seuils en rivière de taille petite/moyenne, comme celle de Saint-Hilaire ou Baerenthal. Dans le deuxième type de retenue de seuil en revanche, les caractéristiques lenticques sont mieux développées et plus intenses, notamment au cours de certaines périodes de l'année. C'est le cas des retenues de seuil formées par un grand seuil en rivière, comme celui de Thévalles, où pendant l'été se forment des véritables stratifications thermiques au sein de la colonne d'eau.

2.2.2 Les échelons supérieurs de lenticité : les étangs et les lacs de barrage

Si nous continuons notre tentative de disposer les écotones artificiels du moins au plus lenticque, immédiatement après les retenues de seuil, nous trouvons les étangs. Nous définissons ce type d'environnement à travers le mot « sublenticque », où le suffixe « sub » désigne les traits de ce type de plans d'eau, qui sont nettement plus lenticques par rapport à ceux d'une retenue de seuil, mais moins par rapport à ceux d'un lac de barrage. Ce groupe aussi peut être ultérieurement subdivisé en deux types de milieux sublenticques : ceux polymictiques discontinus et ceux monomictiques. Dans le premier, la lenticité est beaucoup mieux développée par rapport à leur homologues parolenticques et par exemple elle peut se manifester à travers des périodes de stratification thermique beaucoup plus intenses et longues, qui se vérifient tout au long des saisons d'une année. C'est notamment le cas des étangs de faible profondeur, comme celui de Baerenthal. Dans le deuxième, le niveau de lenticité augmente encore, se manifestant à travers des périodes de stratification thermique d'une durée saisonnière, quelques faibles courants pluridirectionnels ou par de très épaisses couches de sédiments recouvrant les fonds. C'est notamment le cas des étangs très profonds, comme ceux étudiés par Carlini (2006) et Touchart (2007b).

Par conséquent, après les étangs nous retrouvons les lacs de barrage, que nous définissons avec le mot « paralenticques », un mot qui désigne leurs caractéristiques qui ne sont pas purement lenticques, même si elles s'en rapprochent considérablement. Encore une fois, même ce groupe peut être subdivisé en deux types de milieux paralenticques : ceux

monomictiques et ceux dimictiques. Dans les premiers, la lenticité se manifeste à travers des phénomènes très similaires à ceux qui se produisent dans les milieux sublenticques monomictiques. C'est le cas des petits lacs de barrages, où le tributaire joue encore une forte influence sur le volume d'eau qu'ils contiennent. Dans le deuxième, le niveau de lenticité est très proche à de celui d'un grand lac et elle se manifeste, par exemple, à travers un cycle de stratification thermique similaire à celui des lacs. C'est notamment le cas des très grands lacs de barrage, où le tributaire n'arrive plus à exercer une forte influence sur le volume d'eau qu'ils contiennent.

2.2.3 Les écotones artificiels et milieux aquatiques naturels

Nous pouvons essayer d'aller plus loin dans cet exercice de classification des écotones artificiels, en essayant d'insérer au sein de ce gradient que nous venons de créer les environnements naturels qui existent au sein des hydrosystèmes, du moins les plus emblématiques, comme les cours d'eau et les lacs. Respectivement, sur la base de tout ce que nous avons dit au cours de ce manuscrit à leur sujet, nous les considérons comme les milieux les milieux purement lotiques et les milieux purement lenticques : les premiers nous les positionnons à gauche des milieux paralotiques, alors que les deuxièmes nous les plaçons à droite de ceux paralenticques.

Afin d'avoir une vision la plus complète possible des différents milieux qui existent au sein des hydrosystèmes contemporains, nous pouvons aller encore plus loin dans notre classement insérant dans le gradient les estuaires et les mers, que nous nommons respectivement milieux de transition, empruntant leur appellation à la réglementation française (masse d'eau de transition), et milieux lenticques océaniques. Les premiers nous les plaçons à gauche des milieux lotiques et immédiatement après nous plaçons les deuxièmes. Nous avons résumé les résultats de ce travail de classification des milieux aquatiques selon leur caractéristiques abiotiques dans la figure 96³¹.

³¹ Cette figure (mais aussi les concepts que nous venons d'illustrer au cours de ce paragraphe) est une version améliorée de la figure que nous présentons dans Donati et al., 2021).

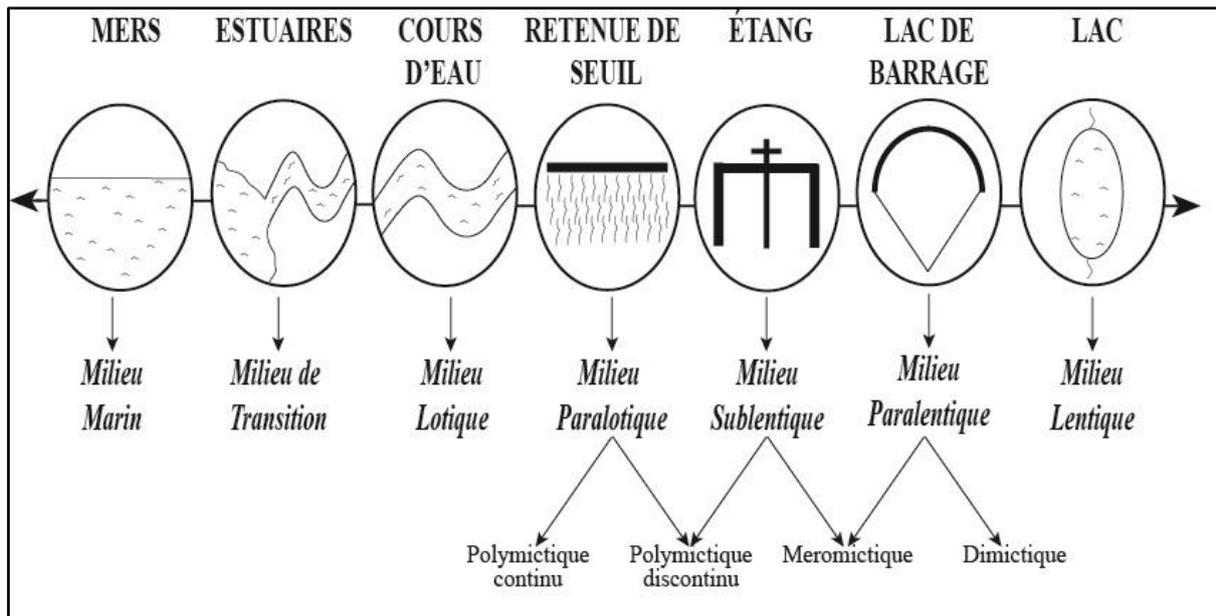


Figure 96 : Le milieux aquatiques terrestre disposés selon un gradient de conditions abiotiques (Réalisation : Francesco Donati).

Ce gradient que nous venons de décrire est loin d'être purement théorique. En effet, en observant les cartes topographiques, on s'aperçoit qu'il existe plusieurs exemples de cette configuration des hydrosystèmes, qui change en fonction de l'échelle spatiale qu'on est en train de considérer. À petite échelle cartographique, c'est-à-dire celle des bassins versants des grands fleuves, le gradient se présente de manière complète, c'est-à-dire avec tous les milieux aquatiques naturels et artificiels qui le composent. Un exemple de cette situation est le bassin versant du Rhône, qui comme nous avons déjà dit au cours de cette partie a été lourdement aménagé et dont le réseau hydrographique est caractérisé par la présence de lacs (le lac Lemans, le lac du Bourget, le lac d'Annecy, etc.), lacs de barrages (le lac de Vouglans, le lac de Coisselt, le lac de Serre-Ponçon, etc.), étangs (comme les nombreux étangs des Dombes), d'innombrables retenues de seuils en rivière et son embouchure dans la mer Méditerranée (fig. 97). À échelle moyenne, c'est-à-dire celle d'un sous-bassin versant d'un grand cours d'eau, il se présente de manière partielle, c'est-à-dire avec seulement une partie des milieux aquatiques qui le composent. Un exemple de cette situation est le bassin versant du Cosson, un sous-affluent de la Loire qui coule dans le centre de la France au milieu de la Sologne, dont le réseau hydrographique est caractérisé par des nombreux étangs et des nombreuses retenues de seuil (fig. 98). À grande échelle cartographique, c'est-à-dire celle d'un tronçon fluvial, il se présente de façons fractionnaires ou inexistant, car généralement dans cet espace on retrouve uniquement un des milieux qui le composent ou aucun. On peut observer un exemple de cette

situation dans les « focales » de la carte de figure 92, où, à cette échelle du réseau hydrographique, on retrouve uniquement le milieu « cours d'eau ».

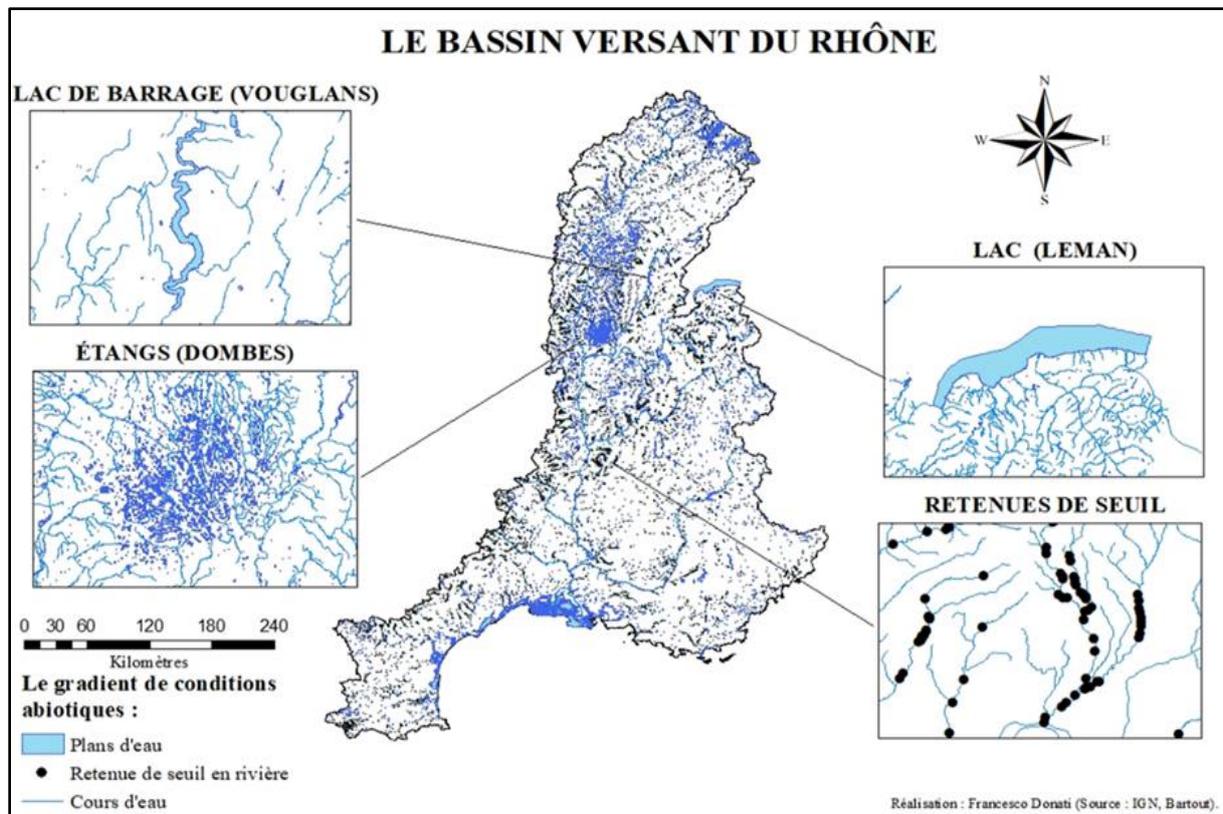


Figure 97 : Le gradient de milieux qu'on retrouve dans le bassin versant du Rhône (Réalisation : Francesco Donati).

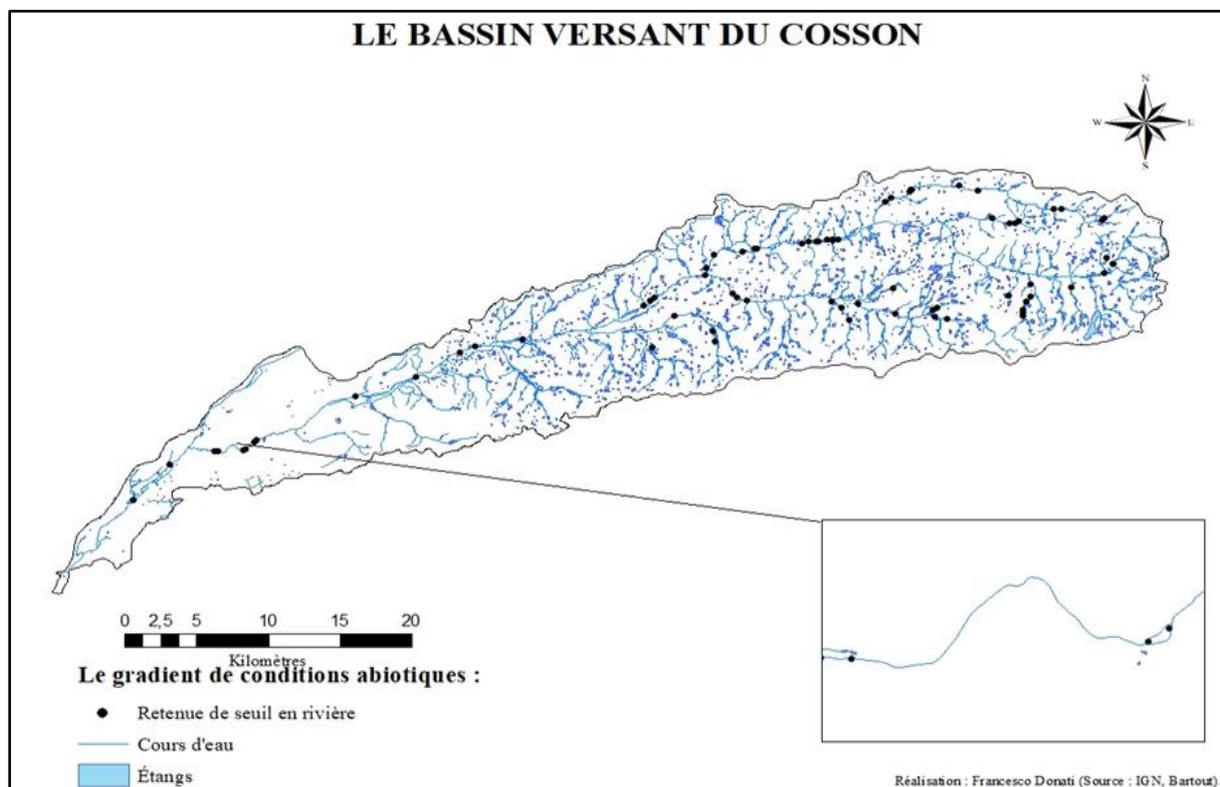


Figure 98 : Le gradient de milieux qu'on retrouve dans le bassin versant du Cosson (Réalisation : Francesco Donati).

CONCLUSION DE LA TROISIÈME PARTIE

Sur la base des notions que nous avons abordées et des réflexions que nous avons réalisées au cours de cette quatrième partie, nous pensons pouvoir avancer que les retenues de seuil peuvent être considérées, à tous les égards, comme des milieux hybrides et plus précisément des écotones. En effet, après plusieurs millénaires de colonisation anthropique, dans les hydrosystèmes ne sont plus seulement constitués de milieux naturels, mais aussi de milieux artificiels, c'est-à-dire des aménagements fluviaux construits, détruits et reconstruits par les hommes au fil du temps. Entre les environnements naturels et ceux anthropiques, des nouveaux espaces sont apparus, qui ont une nature double, croisant en même temps des traits naturels et des caractéristiques imposées par l'homme, à l'instar de ceux exclusivement naturels et décrits dans la littérature scientifique. Dans le cas des retenues de seuils, leur fonctionnement d'écotone est appréciable à travers les aspects suivants :

- Elles se situent entre un milieu naturel (le cours d'eau) et un milieu anthropique (le seuil en rivière ou plus généralement un moulin à eau, un chenal de dérivation, etc.).
- Leur fonctionnement est un mélange de conditions naturelles (celles qu'on retrouve normalement dans les milieux lotiques) et d'autres dérivant de l'action de l'homme (le ralentissement du courant et le rehaussement de la ligne d'eau), qui forment le gradient environnemental qu'on retrouve généralement dans les écotones, le mélange des caractéristiques des deux environnements qui se rencontrent.
- Ce gradient environnemental évolue sous l'action d'un forçage, l'écoulement du tributaire, qui fait varier le gradient environnemental caractérisant la retenue de seuil et par conséquent leur fonctionnement. Plus précisément, au cours des hautes eaux la retenue de seuil présente un fonctionnement typiquement lotique, au cours des basses eaux, elle peut présenter des traits lenticques et quand le gradient est en équilibre elle présente ce que nous appelons un fonctionnement paralotique.

Contrairement aux affirmations trouvées dans certains textes relayés par des organismes de gestion de l'eau ou de certaines ONG naturalistes, la nature de ces environnements n'est pas comparable à celle d'un étang ou d'un lac de barrage. En effet, si on voulait ordonner ces aménagements anthropiques du moins au plus lenticque, les seuils en rivière seraient le plus bas niveau de lenticité.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

LES RETENUES DE SEUIL : UN MILIEUX DONT LA NATURE EST HYBRIDE

À l'issue de ce travail, il est possible de revenir sur le grand problème posé au départ, qui est de savoir si, oui ou non, les seuils en rivière transforment les milieux lotiques en milieux lenticques, créant des espaces qui fonctionnent comme des plans d'eau. Sur la base des éléments théoriques que nous avons illustré au début de cette recherche, de leur étude pratique dans trois retenues de seuil et de l'interprétation des résultats obtenus dans les terrains d'étude, nous répondons de manière négative à cette question : les environnements qui se forment à l'amont de ces ouvrages hydrauliques ne sont pas des milieux lenticques, du moins pour ce qui concerne leur définition classique. En effet, il est évident que les compartiments hydrodynamiques, sédimentaires et thermiques de ces environnements ne fonctionnent pas comme dans un plan d'eau et que par conséquent notre hypothèse de départ est infirmée. Paradoxalement, cela ne signifie pas que si nous avons formulé l'hypothèse inverse, c'est-à-dire que les compartiments hydrodynamiques, sédimentaires et thermiques des retenues de seuil fonctionnent comme dans les milieux d'eau courante, elle aurait été confirmée, car on a vu que leurs caractéristiques ne sont pas tout à fait similaires à celles des fleuves et des rivières, notamment à l'amont de certains types de seuil et pendant certaines périodes de l'année. Sur la base de ces considérations, nous affirmons que la nature des retenues de seuil est hybride, c'est-à-dire qu'elle croise en même temps les traits des cours d'eau et ceux des plans d'eau.

L'ÉCOTONE RETENUE DE SEUIL

Plus précisément, nous définissons ce fonctionnement abiotique spécifique aux retenues de seuil comme étant paralotique, c'est-à-dire avec une solide base lotique qui se renforce et s'affaiblit au fil des saisons d'une année, pouvant acquérir des traits typiques des plans d'eau. En effet, la nature de ces environnements n'est pas figée dans le temps, mais elle évolue au fil du temps, suivant le cycle hautes eaux - basses eaux :

- La caractéristique fondamentale d'une retenue de seuil est le rehaussement de la ligne d'eau et le ralentissement du courant que l'ouvrage transversal qui la forme lui impose et qui lui confère son typique fonctionnement hybride paralotique.
- Au cours des hautes eaux, les caractéristiques lotiques se renforcent et dominent la retenue de seuil, qui apparaît comme un véritable cours d'eau, notamment pendant les crues où l'ouvrage peut devenir transparent.

- Au cours des basses eaux, en revanche, les caractéristiques lentiques se renforcent et le fonctionnement de la retenue de seuil prend des traits typiques des plans d'eau, notamment quand les débits du tributaire sont au plus bas.

Ce type de fonctionnement, son évolution temporelle et la configuration spatiale des espaces qui se forment à l'amont d'un seuil en rivière nous font penser que ces environnements puissent être considérés comme des écotones, un mot communément utilisé au sein des sciences naturelles pour désigner les écosystèmes qui se forment à la rencontre de deux milieux différents et qui en partagent les respectives fonctionnements respectifs. Ces types de milieux sont très répandus au sein des hydrosystèmes, en général du fait des échanges multidimensionnels qui les caractérisent. Un grand nombre d'entre eux sont des écotones naturels, comme les mouilles, les zones humides qu'on retrouve au sein des plaines d'inondation ou les zones hyporhéiques des cours d'eau. Toutefois, après plusieurs millénaires de colonisation humaine qui a profondément changé les fonctionnalités et l'aspect de ces milieux, nous pensons que ce vaste panorama d'écotones naturels s'est enrichi avec des nouveaux écotones d'origine anthropique et que parmi eux puissent être insérées les retenues de seuil. En effet, dans ces environnements, nous retrouvons les mêmes traits qui caractérisent les écotones naturels et plus précisément :

- Le fait de se situer à la rencontre de deux milieux différents, l'un étant naturel (le cours d'eau), l'autre artificiel (le volume d'eau retenue par le seuil en rivière).
- Le fait d'être caractérisé par un gradient environnemental, qui se manifeste à travers l'augmentation de la profondeur de l'eau et le ralentissement du courant du tributaire.
- Le fait que ce gradient environnemental évolue dans le temps sous l'effet d'un forçage, qui dans le cas des retenues de seuil peut être naturel ou anthropique et qui change l'aspect de cet environnement au fil des saisons.

Un ultérieur indice qui nous pousse à définir les retenues de seuil comme des écotones est le changement des flux de matières qui se produisent en son sein et qui se manifestent à travers le changement de la compétence du tributaire. Similairement à ce qui se passe dans ce type d'environnement, cette modification n'est pas définitive, mais temporaire, son ampleur suivant les fluctuations hautes-basses eaux.

DES NOUVELLES PERSPECTIVES POUR LA LIMNOLOGIE ?

L'idée des retenues de seuil comme des environnements hybrides et la définition de leur fonctionnement paralotique nous ont poussé plus loin dans notre raisonnement, nous amenant à reformuler la conception qu'on a des milieux aquatiques qu'on retrouve dans les hydrosystèmes d'aujourd'hui et plus précisément de ceux lenticques. En effet, l'hybridité qui caractérise les retenues de seuil est un trait qu'elles partagent avec d'autres types de retenues très récurrentes le long des fleuves et des rivières contemporains : les étangs et les lacs de barrage. Toutefois, l'hybridation de ces trois milieux artificiels ne peut pas être mise sur le même plan, car, quand on compare leur fonctionnement, on s'aperçoit qu'ils sont très différents et ceci pose évidemment la question de l'adaptabilité des propositions de gestion contemporaines extrapolées à partir du cours d'eau ou du lac en fonction de la masse d'eau administrative dans laquelle cet écotone se situe. Si on voulait les disposer en ordre croissant, du plus lenticque au moins lenticque, on aurait dans l'ordre :

- Les milieux paralotiques, comme les retenues de seuil, où la lenticité est faible, voire extrêmement faible à l'amont des seuils les plus petits.
- Les milieux sublenticques, comme les étangs, où la lenticité est devenue plus importante, notamment dans ceux les plus profonds.
- Les milieux paralenticques, comme les lacs de barrage, où la lenticité peut devenir très similaire à celle des grands lacs, notamment dans les réservoirs les plus grands.

Cette nouvelle conception des milieux lenticques ouvre sans doute de nouvelles perspectives de recherche au sein de la Limnologie, mais plus généralement de l'hydrologie continentale car elle permettrait entre autres de faire travailler davantage ensembles potamologues et limnologues sur des objets hydrologiques aux caractéristiques doubles et ainsi pouvoir offrir aux gestionnaires des propositions de gestion moins tranchées que celles actuellement en place, permettant un meilleur état des milieux (et donc de l'eau) mais également une conflictualité moindre.

PERSPECTIVES DE RECHERCHE SUR LES RETENUES DE SEUIL

Ainsi, cette vision moins tranchante des effets des seuils en rivière et plus en générale cette idée d'écotones artificiels que nous avons formulée ouvre des intéressantes perspectives de recherche. En effet, notre travail a seulement effleuré la surface des milieux qui se forment

à l'amont de ces ouvrages hydrauliques, qui restent encore très méconnus et dont certains aspects méritent d'être approfondis, comme le démontrent aussi certains évènements politiques/judiciaires qui ont eu lieu récemment, à titre d'exemple l'annulation de l'article 1^{er} du décret du 3 août 2019³² ou la modification de l'article 214-17 du code de l'environnement³³. Plus précisément, nous pensons que les études futures à propos de ces environnements devraient s'orienter autour de trois grands axes : celui abiotique, celui biotique et celui paysager.

Dans le premier, il faudrait répéter ce type d'étude centré sur le fonctionnement abiotique des retenues des seuils dans d'autres terrains d'étude, afin de confirmer ou démentir les aspects que notre travail a mis en évidence ou pourquoi pas d'examiner leur fonctionnement dans d'autres contextes hydro-climatiques, comme celui méditerranéen ou continental. Selon nous, une attention particulière doit être consacrée aux grandes retenues de seuil, où l'hybridité semblerait se développer davantage et dont certains aspects relatifs à leur fonctionnement mériteraient d'être approfondis avec des instruments plus performants que ceux dont on disposait (nous nous référons notamment à ceux hydrodynamiques).

Dans le deuxième, il faudrait comprendre quel est le fonctionnement biologique interne des retenues de seuil, afin de saisir si lui aussi est caractérisé par une quelconque forme d'hybridité.

Dans le troisième axe, il faudrait comprendre quel est le rôle paysager joué par les retenues de seuil, c'est-à-dire essayer de saisir quels sont les environnements dont l'existence est étroitement liée aux espaces qui se forment à l'amont des seuils en rivière. Le point de rencontre entre ces trois axes serait les recherches vouées à la compréhension des éventuels effets exercés par les retenues de seuils et à la façon de les maîtriser, mais aussi à la détermination des éventuels effets collatéraux des opérations de restauration fluviale, qui effaçant les seuils en rivière pourraient détruire également des milieux annexes au cours d'eau. Ce type d'étude peut également être étendu aux sociétés qui vivent aux alentours d'une retenue de seuil : cela permettrait de tester le concept de limnosystème élaboré par Touchart & Bartout (2018) à l'environnement qui constitue le plus petit niveau de lenticité.

³² Le 1^{er} article du décret du 3 août 2019 définissait de manière très étendue la notion d'obstacle à la continuité écologique.

³³ Les modifications à cet article de la loi essaient de concilier la préservation de l'ouvrage et la préservation des milieux aquatiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Ahad A. et Ferdous A. (2019). *Dictionary of Ecology and Environmental Science*. Himachal Publication.
- Albert M.-B. (1992). Équilibre morphologique et débit de plein bord. *L'avenir de l'eau. Quelques réponses des sciences hydrotechniques à une inquiétude mondiale. Vingt deuxièmes journées de l'hydraulique*, p. 1-10.
- Allen K. R. (1951). *The Horokiwi Stream : A Study of a Trout Population*. New Zealand Marine Department.
- Amat J.-P., Coeur C. L., Dorize L., et Gautier E. (2008). *Éléments de géographie physique*. Editions Bréal.
- Amoros C. & Petts G. E. (1993). *Hydrosystèmes fluviaux*. Masson.
- Angelier E. (2000). *Ecologie des eaux courantes*. Ed. Tec et Doc.
- Andriamahefa H. (1999). Les hydro-écorégions du bassin de la Loire : Morphologie, hydrologie, pressions anthropiques sur les cours d'eau et les bassins-versants [These de doctorat, Saint-Etienne]
- Arnaud P. (2007). *Chimie physique : Les cours de Paul Arnaud : cours avec 350 questions et exercices corrigés*. Dunod.
- Atlas Catalogue du Sandre*. (2017). Sandre. <http://www.sandre.eaufrance.fr/atlas/srv/fre/catalog.search;jsessionid=node0161l50ptz1fz61ose3l86q7oqw111809.node0#/metadata/5a2cdc66-36be-4bc7-be00-e04736bc7ba6>
- Banas D. (2007). La sédimentation en étang et son hétérogénéité géographique. In Touchart L. (Éd.), *Géographie de l'étang : Des théories globales aux pratiques locales* (p. 103-118). L'Harmattan.
- Barletta M. et Dantas D. V. (2016). Environmental Gradients. In M. J. Kennish (Éd.), *Encyclopedia of Estuaries* (p. 1-6). Springer Netherlands.
- Barraud R. (2011). Rivières du futur, wild rivers ? *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 10.
- Barraud R., Lespez L., Germaine M.-A., Ballut C., et Fournier P. (2013). Moulins à eau et ouvrages hydrauliques, outils de reconstitution et d'interprétation des trajectoires paysagères des fonds de vallées. In *Au fil de l'eau. Ressources, risques et gestion du Néolithique à nos jours* (p. 71-88). Maison des Sciences de l'Homme.
- Bathurst J. C. (1993). Flow Resistance through the Channel Network. In Beven K. J. & Kirkby M. J. (Éds.), *Channel Network Hydrology* (p. 69-98). Wiley.
- Baud D., Reynard E. et Bussard J. (2015). Les transformations paysagères de la plaine du Rhône. Analyse diachronique et cartographie historique (1840-2010). In Reynard E. et Evéquozy-Dayen et Borel G. (Éds.), *Le Rhône, entre nature et société* (Numéro 29, p. pp.225-258). Vallesia ; Archives de l'Etat du Valais.

- Beaufort A. (2015). *Température des cours d'eau : Analyse des données et modélisation : Application au bassin de la Loire*. (N° EA6293; p. 66). ONEMA & Univ. Tours.
- Berkes F., Colding J. et Folke C. (2003). *Navigating Social-Ecological Systems : Building Resilience for Complexity and Change*. Cambridge University Press.
- Berkes F. et Folke C. (1998). Linking Social and Ecological Systems : Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience. In Berkes F. & Folke C. (Éds.), *Linking Social and Ecological Systems Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience* (p. 1-25). Cambridge University Press.
- Bertrand G. (1968). Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 39(3), p. 249-272.
- Bettinetti R., Crosa G. et Galassi S. (2007). *Ecologia delle acque interne*. Città Studi Edizioni.
- Bethemont, J., Andriamahefa, H., Rogers, C., & Wasson, J.-G. (1996). Une approche régionale de la typologie morphologique des cours d'eau. Application de la méthode « morphorégions » au bassin de la Loire et perspectives pour le bassin du Rhône (France). *Géocarrefour*, 71(4), p. 311-322.
- Bilby R. E. (1984). Characteristics and Frequency of Cool-water Areas in a Western Washington Stream. *Journal of Freshwater Ecology*, 2(6), 593-602.
- Blott S. J. et Pye K. (2001). GRADISTAT : A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248.
- Boggero A., Zaupa S. et Guarieri, I. (2011). *Protocollo di campionamento ed analisi granulometrica di sedimenti lacustri*. Istituto per lo studio degli ecosistemi.
- Bormans M., Maier H., Burch M. et Baker P. (1997). Temperature stratification in the lower River Murray, Australia : Implication for cyanobacterial bloom development. *Marine and Freshwater Research*, 48(7), p. 647-654.
- Bormans, M. et Webster, I. T. (1998). Dynamics of Temperature Stratification in Lowland Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(10), 1059-1063.
- Bossut C. (1775). *Traité Élémentaire D'Hydrodynamique : Ouvrage Dans Lequel La Théorie Et l'Expérience s'éclaircissent ou se suppléent mutuellement*. Jombert.
- Bravard J.-P. (2018). *La continuité sédimentaire passe-t-elle par l'arasement systématique des seuils ? Une analyse critique*. Observatoire de la continuité écologique et des usages de l'eau. <https://continuite-ecologique.fr/la-destruction-des-seuils-est-elle-obligatoire/>
- Bravard J.-P., Lippmann-Provansal M., Arnaud-Fassetta G., Chabbert S., Gaydou P., Dufour S., Richard F., Valleteau S., Melun G. et Passy P. (2008). Un atlas du paléo-environnement de la plaine alluviale du Rhône, de la frontière suisse à la mer. *Collection EDYTEM. Cahiers de géographie*, 6(1), p. 101-116.
- Bravard J.-P. et Petit, F. (2000). *Les cours d'eau : Dynamique du système fluvial*. A. Colin.
- Brown A. G., Lespez L., Sear D. A., Macaire J.-J., Houben P., Klimek K., Brazier R. E., Van Oost K. et Pears B. (2018). Natural vs anthropogenic streams in Europe : History,

- ecology and implications for restoration, river-rewilding and riverine ecosystem services. *Earth-Science Reviews*, 180, p. 185-205.
- Bruhier S. V. (1998). Transformation des paysages et dynamiques de la biodiversité végétale. Les écotones, un concept clé pour l'étude des végétations post-culturelles. L'exemple de la commune d'Aussois (Savoie). Cemagref
- Caissie D. (2006). The thermal regime of rivers : A review. *Freshwater Biology*, 51(8), p. 1389-1406.
- Caissie D., Satish M. G., & El-Jabi N. (2005). Predicting river water temperatures using the equilibrium temperature concept with application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada). *Hydrological Processes*, 19(11), p. 2137-2159.
- Campy M. et Meybeck M. (1995). Les sédiments lacustres. In R. Pourriot & M. Meybeck (Éds.), *Limnologie générale* (p. 185-226). Masson.
- Capinera J. L. (2006). *Encyclopedia of Entomology*. Springer Science & Business Media.
- Carlini M. (2006). *Morphologie et hydrodynamique des plans d'eau : Le cas des étangs-lacs en Limousin* [These de doctorat, Limoge].
- Chaalali A. (2013). *Évolution à long terme de l'écosystème estuarien de la Gironde* [These de doctorat, Bordeaux 1].
- Champion E. (1996). *Moulins et meuniers carolingiens : Dans les polyptyques entre Loire et Rhin*. Association pour l'édition et la diffusion des études historiques.
- Chanoine M. (1855). *Notice sur les barrages mobiles et automobiles*. Libraire des corps impériaux des ponts et des chaussées et des mines.
- Chanson H. (2005). Mascaret, Aegir, Pororooca, Tidal Bore. Quid ? Où ? Quand ? Comment ? Pourquoi ? *La Houille Blanche*, 3, p. 103-114.
- Chanson H. (2012). *Tidal Bores, Aegir, Eagre, Mascaret, Pororooca : Theory and Observations*. World Scientific.
- Charlton R. (2008). *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. Routledge.
- Chanoine, M. (1839). Mémoire sur le barrage d'Épinau. *Annales des ponts et chaussées. Mémoires et documents relatifs à l'art des constructions et au service de l'ingénieur*, 238-371.
- Choffel Q. (2019). *La différenciation des masses d'eau à l'intérieur de l'étang : Stratification verticale, zonation horizontale, bilan thermique et centre thermique* [Thèse de doctorat, Orléans].
- Ciabatti M. (1982). *Elementi di idrologia superficiale*. CLUEB.
- Ciccacci S. (2015). *Le forme del rilievo. Atlante illustrato di geomorfologia*. Mondadori Università.
- Csiki S. J. & Rhoads B. L. (2014). Influence of four run-of-river dams on channel morphology and sediment characteristics in Illinois, USA. *Geomorphology*, 206, p.215-229.

- Csiki S. et Rhoads B. L. (2010). Hydraulic and geomorphological effects of run-of-river dams. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 34(6), p. 755-780.
- Danel P., Durand R. et Condolios E. (1953). Introduction à l'étude de la saltation. *La Houille Blanche*, 6, 815-829.
- Degoutte G. (2012). *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : Hydraulique et morphologie fluviales appliquées*. Éd. Tec & doc : Lavoisier.
- Demangeot J. (2016). *Les milieux naturels du globe*. Armand Colin.
- DGR (2002). *Le système canadien de classification des sols*. CNRC-NRC, Presses scientifiques du CNRC.
- Dingman L. (2009). *Fluvial Hydraulics*. Oxford University Press.
- Donati F., Touchart L., et Bartout P. (2019). Do rivers upstream weirs have lotics or lentic characteristics ? *Geographia Technica*, 14(2), p. 1-9.
- Donati F., Touchart L. et Bartout P. (2020). Les seuils en rivière transforment-ils les milieux lotiques en milieux lentiques ? *Physio-Géo, Volume 15*, p. 111-131.
- Donati F., Touchart L., Bartout P., & Choffel Q. (2021). Anciens et nouveaux écosystèmes aquatiques : Une revue sur leur fonctionnement abiotique. *Dynamiques Environnementales*, (Article accepté, en cours de publication).
- Dufour S. et Piégay H. (2010). Channel vertical mobility, hydro-geomorphic disturbances and understory vegetation in floodplain forests of the Ain River (France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 16(4), p. 371-386.
- Dufour S. et Rodríguez-González, M. (2019). *Définition des zones riveraines et de la végétation riveraine : Principes and recommandations* (N° CA16208; p. 20). Converges. <https://converges.eu/resources/riparian-zone-riparian-vegetation-definition-principles-and-recommendations>
- Dussart B. (1992). *Limnologie : L'étude des eaux continentales*. N. Boubée & Cie.
- Dyer K. R. (1979). *Estuarine Hydrography and Sedimentation : A Handbook*. Cambridge University Press.
- Dyer K. R. (1997). *Estuaries : A Physical Introduction*. Wiley.
- Ebersole J. L., Liss, W. J. et Frissell, C. A. (2003). Cold Water Patches in Warm Streams : Physicochemical Characteristics and the Influence of Shading. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(2), p. 355-368.
- Elliott J. M. (2000). Pools as refugia for brown trout during two summer droughts : Trout responses to thermal and oxygen stress. *Journal of Fish Biology*, 56(4), p. 938-948.
- Engel F. & Fischer, H. (2017). Effect of Thermal Stratification on Phytoplankton and Nutrient Dynamics in a Regulated River (Saar, Germany). *River Research and Applications*, 33(1), p. 135-146.

- Entwistle N., Heritage G. et Milan, D. (2019). Ecohydraulic modelling of anabranching rivers. *River Research and Applications*, 35(4), p. 353-364. 3
- Escourrou G. (1982). *Le climat de la France*. FeniXX.
- Evans E. C., McGregor G. R. et Petts G. E. (1998). River energy budgets with special reference to river bed processes. *Hydrological Processes*, 12(4), p. 575-595.
- Fencil J. S., Mather M. E., Costigan K. H. et Daniels M. D. (2015). How Big of an Effect Do Small Dams Have? Using Geomorphological Footprints to Quantify Spatial Impact of Low-Head Dams and Identify Patterns of Across-Dam Variation. *PLOS ONE*, 10(11), p. 1-22.
- Fenoglio S. et Bo T. (2009). *Lineamenti di Ecologia Fluviale*. Città Studi Edizioni.
- Fenoglio S. et Bo T. (2014). Possibili impatti del cambiamento climatico globale sulle entomocenosi dei sistemi fluviali di basso ordine. *Biologia Ambientale*, 28, p. 59-66.
- Ford D. E. (1990). Reservoir transport processes. In K. W. Thornton, B. L. Kimmel, & F. E. Payne (Éds.), *Reservoir Limnology : Ecological Perspectives* (p. 15-42). John Wiley & Sons.
- Ford D. E. et Johnson, M. C. (1983). *An assessment of reservoir density currents and inflow processes. Rapport final*, 112 p.
- Fort M., Bétard F. et Arnaud-Fassetta G. (2015). *Géomorphologie dynamique et environnement*. Armand Colin.
- Geguzis R., Baublys R. et Vaikasas S. (2014). Froude number for estimation of biodiversity in small Lithuanian rivers. *Research for Rural Development. International Scientific Conference Proceedings (Latvia)*. International Scientific Conference: Research for Rural Development, Jelgava.
- Germaine M.-A. et Barraud R. (2017). Introduction. In Germaine M.-A. et Barraud R., *Démanteler les barrages pour restaurer les cours d'eau : Controverses et représentations* (p. 13-26). Éditions Quae.
- Gibert J., Mathieu J. et Fournier F. (1997). The groundwater/surface water ecotone perspective : State of the art. In J. Gibert, J. Mathieu, & F. Fournier (Éds.), *Groundwater/Surface Water Ecotones : Biological and Hydrological Interactions and Management Options* (p. 3-8). Cambridge University Press.
- Gilbert G. K. (1914). *The Transportation of Débris by Running Water*. USGS.
- Grant G. E. (1997). Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams : A new hypothesis. *Water Resources Research*, 33(2), p. 349-358.
- Håkanson L. (1981). *A Manual of Lake Morphometry*. Springer Science & Business Media.
- Håkanson L. et Jansson M. (1983). *Principles of lake sedimentology*. The blackburn press.
- Halliday D., Resnick R. et Walker J. (2004). *Fundamentals of Physics*. Wiley.

- Hancock G. S., Anderson R. S., Whipple K. X., Tinkler K. J. et Wohl E. E. (1998). Beyond Power : Bedrock River Incision Process and Form. In *Rivers Over Rock : Fluvial Processes in Bedrock Channels*, (Vol. 107, p. 35-60). American Geophysical Union.
- Handcock R. N., Torgersen C. E., Cherkauer K. A. Gillespie A. R., Tockner K., Faux R. N., Tan J., Carbonneau P. E. et Piégay H. (2012). Thermal Infrared Remote Sensing of Water Temperature in Riverine Landscapes. In *Fluvial Remote Sensing for Science and Management* (p. 85-113). John Wiley & Sons.
- Hayashi M. et Rosenberry D. O. (2002). Effects of ground water exchange on the hydrology and ecology of surface water. *Ground Water*, 40(3), p. 309-316.
- Henderson F. M. (1966). *Open channel flow*. Macmillan.
- Hey R. D. (1988). Bar Form Resistance in Gravel-Bed Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(12), 1498-1508.
- Hicks D. M. et Gomez B. (2016). Sediment transport. In *Tools in Fluvial Geomorphology* (p. 324-356). John Wiley & Sons, Ltd.
- Hjulström F. (1935). *Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris*. Uppsala.
- Hobbs R. J., Arico S., Aronson J., Baron J. S., Bridgewater P., Cramer, V. A., Epstein P. R., Ewel J. J., Klink C. A., Lugo A. E., Norton D., Ojima D., Richardson D. M., Sanderson, E. W., Valladares F., Vilà M., Zamora R., & Zobel M. (2006). Novel ecosystems : Theoretical and management aspects of the new ecological world order: Novel ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 15(1), p. 1-7.
- Hobbs R. J., Higgs E. et Harris J. A. (2009). Novel ecosystems : Implications for conservation and restoration. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(11), p. 599-605.
- Holland M. M., Whigham D. F. et Gopal B. (1990). The characteristics of wetland ecotones. In H. Décamps & R. J. Naiman (Éds.), *The Ecology and Management of Aquatic-Terrestrial Ecotones* (p. 171-198). The parthenon publishing group.
- Huet M. (1949). Appréciation de la valeur piscicole des eaux douces. *Travaux de la station de recherche des eaux et forêt*, D, 89 p.
- Hutchinson E. G. (1957). *A treatise on limnology*. John Wiley & Sons.
- Hutchinson E. G. et Löffler, H. (1956). *The thermal classification of lakes*. 42(2), p. 84-86.
- Illies J. et Botosaneanu L. (1963). Problèmes et méthodes de la classification et de la zonation écologique des eaux courantes, considérées surtout du point de vue faunistique. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 12, p. 1-57.
- Jalmain D. (1999). Verdes. *Supplément à la Revue archéologique du centre de la France*, 17(1), p. 187-191.
- Johnson S. L. (2003). Stream temperature : Scaling of observations and issues for modelling. *Hydrological Processes*, 17(2), p. 497-499.

- Johnston C. A. (1993). Material Fluxes Across Wetland Ecotones in Northern Landscapes. *Ecological Applications*, 3(3), p. 424-440.
- Jowett I. G. (1993). A method for objectively identifying pool, run, and riffle habitats from physical measurements. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 27(2), p. 241-248.
- Kaandorp V. P., Molina-Navarro E., Andersen H. E., Bloomfield J. P., Kuijper, M. J. M., & de Louw, P. G. B. (2018). A conceptual model for the analysis of multi-stressors in linked groundwater–surface water systems. *Science of The Total Environment*, 627, 880-895. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.259>
- Kemp, J. L., Harper, D. M., & Crosa, G. A. (2000). The habitat-scale ecohydraulics of rivers. *Ecological Engineering*, 16(1), 17-29. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(00\)00073-2](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00073-2)
- Kennedy, R. H., Robert, G. C. et Thornton, K. W. (1982). The Establishment of Water Quality Gradients in Reservoirs. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 7(1), p. 71-87.
- Knighton D. (1998). *Fluvial Forms and Processes : A New Perspective*. Arnold.
- Kolasa J. et Zalewski, M. (1995). Notes on ecotone attributes and functions. *Hydrobiologia*, 303(1), p. 1-7.
- Krumbein W. C. (1934). Size frequency distributions of sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 4(2), p. 65-77.
- Langdon J. et Langdon, P. of B. M. H. J. (2004). *Mills in the Medieval Economy : England p. 1300-1540*. Oxford University Press.
- Łaszewski M. (2013). Stream water temperature : A short review with special reference to diurnal dynamics. *Miscellanea Geographica*, 17(1), p. 34-41.
- Le Coz J., Camenen B., Dramais G., Ribot-Bruno J., Ferry M. et Rosique J.-L. (2011). *Contrôle des débits réglementaires*. Onema & Cemagref. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewijp8uqsJTvAhUSyxoKHD9uCqkQFjAAegQIARAD&url=http%3A%2F%2Fwww.fomodo.fr%2Ffiles%2FONEMA_controle-debits-reglementaires_11-2011.153.pdf&usg=AOvVaw0q2_mhC28W5s1KkjkkmJR
- Lefort P. (2018). *Morphodynamique fluviale : Approche théorique et expérimentale*. Presses des Ponts.
- Legros J.-P. (1996). *Cartographies des sols : De l'analyse spatiale à la gestion des territoires*. PUR presses polytechniques.
- Lemmin U. (1995). Limnologie physique. In R. Pourriot & M. Meybeck (Éds.), *Limnologie générale* (p. 61-106). Masson.
- Lespez L., Beauchamp, A., Germaine, M.-A., & Barraud, R. (2017). De l'aménagement au désaménagement : Les temps de l'environnement des systèmes fluviaux ordinaires de l'Ouest de la France. In Germaine M.-A. & Barraud R., *Démanteler les barrages pour restaurer les cours d'eau : Controverses et représentations* (p. 27-43). Éditions Quae.

- Lespez L. et Dufour S. (2020). La nature de l'Anthropocène : Nature anthropisée, nature hybridée. In S. Dufour & L. Lespez, *Géographie de l'environnement. La nature au temps de l'Anthropocène* (p. 17-31). Armand Colin.
- Lespez L. et Dufour, S. (2021). Les hybrides, la géographie de la nature et de l'environnement. *Annales de géographie*, N°737(1), 58-85.
- Lévêque C. (1996). *Écosystèmes aquatiques*. Hachette.
- Lévêque C., Muxart T., Leeuw S. V. D., Weill A. et Abbadie L. (2003). L'anthroposystème et la zone atelier : Nouveaux concepts territorialisés de l'étude des interactions société/milieux. In Génin A. et Frédéric A. (Éds.), *Continu et discontinu dans l'espace géographique* (p. 279-292). Presses universitaires François-Rabelais.
- Lewis W. M. (1983). A Revised Classification of Lakes Based on Mixing. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40, p. 1779-1787.
- Lobry J. (2004). *Quel référentiel de fonctionnement pour les écosystèmes estuariens ? : Le cas des cortèges de poissons fréquentant l'estuaire de la Gironde* [These de doctorat, Bordeaux 1].
- Malavoi J.-R. (2003). *Stratégie d'intervention de l'Agence de l'eau sur les seuils en rivière* (N° AFF02011 ; 135 p.). Agence de l'Eau Loire- Bretagne.
- Malavoi J.-R., & Salgues D. (2011). *Arasement et dérasement de seuils. Aide à la définition de Cahier des Charges pour les études de faisabilité Compartiments hydromorphologie et hydroécologie* (N° V0; 83 p.). Onema & Cemagref.
- Maleval V. et Jigorel A. (2002). La sédimentation dans un lac artificiel. Exemple du lac de Saint-Pardoux, massif d'Ambazac, Limousin, France / Sedimentation in an artificial lake at Saint-Pardoux, massif d'Ambazac (Limousin, France). *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 8(4), p. 307-319.
- Maleval V. et Pitois F. (2017). Fonctionnement hydro-sédimentaire et bilan sédimentaire du lac de Saint-Germain-de-Confolens (Charente, France) : Paramètres géomorphologiques à prendre en considération dans la gestion du lac. *Physio-Géo, Volume 11*, p.197-227.
- Malm J., Grahn L., Mironov D. et Terzhevik A. (1993). Field Investigation of the Thermal Bar in Lake Ladoga, Spring 1991. *Hydrology Research*, 24(5), p. 339-358.
- Marchetti M. (2000). *Geomorfologia fluviale*. Pitagora Editrice.
- Marmonier P., Dole-Olivier M.-J., Châtelliers M. C., Chapuis H., Re-Bahuaud J., Johannet, A. et Cadilhac L. (2019). Contribution des zones d'échanges entre eau de surface et eau souterraine à la biodiversité des hydrosystèmes : Exemple d'une rivière méditerranéenne, la Cèze. *Physio-Géo, Volume 13*, p. 75-90.
- Mateus M. et Baretta J. W. (2008). Basic concepts of estuarine ecology. In Neves R., Baretta J. W. et Mateus M. (Éds.), *Perspectives on Integrated Coastal Zone Management in South America* (p. 3-14). IST Press.
- Matthews, K. R., Berg, N. H., & Azuma, A. D. (1994). Cool Water Formation and Trout Habitat Use in a Deep Pool in the Sierra Nevada, California. *Transactions of the American Fisheries Society* 1, 123, p. 549-564.

- Minard C. (1851). *Cours de construction des ouvrages qui établissent la navigation des rivières et des canaux*. Dominique Avanzo et Compagnie Éditeurs.
- Minshall W. G. (1984). Aquatic Insect-Substratum Relationships. In Resh V. H. & Rosenberg D. M (Éds.), *The Ecology of Aquatic Insects* (p. 385-400). Praeger.
- Mohseni O. et Stefan, H. G. (1999). Stream temperature/air temperature relationship: A physical interpretation. *Journal of Hydrology*, 218, p. 128-141.
- Moore R. D., Spittlehouse D. L. et Story A. (2005). Riparian Microclimate and Stream Temperature Response to Forest Harvesting: A Review1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41(4), p. 813-834.
- Morisawa M. W. (1968). *Streams; Their Dynamics and Morphology*. McGraw-Hill.
- Mount J. F. (1995). *California Rivers and Streams : The Conflict Between Fluvial Process and Land Use*. University of California Press.
- Musy A., Higy C. et Reynard E. (2014). *Hydrologie : Une science de la nature, une gestion sociétale*. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Naiman R. J., Décamps H., Pastor J. et Johnston C. A. (1988). The Potential Importance of Boundaries of Fluvial Ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 7(4), p. 289-306.
- Naumenko M. A., Karetnikov S. G. et Tikhomirov A. I. (1996). Marn features of the thermal regime of Lake Ladoga during the ice-free period. *Hydrobiologia*, 322(1-3), p. 69-73.
- Nielsen J. L., Lisle T. E. et Ozaki V. (1994). Thermally stratified pools and their use by steelhead in northern California streams. *Transactions of the American Fisheries Society*, 123, p. 613-626.
- Oertli B. et Frossard P.-A. (2014). *Mares et étangs : Ecologie, gestion, aménagement et valorisation*. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Olness A. et Rausch D. (1977). Callahan Reservoir : III. Bottom sediment-water-phosphorus relationships. *Transactions - American Society of Agricultural Engineers*, 20, p. 291-297.
- Omernik, J. M. (1987). Ecoregions of the Conterminous United States. *Annals of the Association of American Geographers*, 77(1), p. 118-125.
- Ozaki V. L. (1988). Geomorphic and Hydrologic Conditions for Cold Pool Formation on Redwood Creek, California. *Redwood National Park Research and Development Technical Report*, 24.
- Panizza M. (2014). *Geomorfologia*. Pitagora.
- Pardé M. (1933). *Fleuves et rivières / par Maurice Pardé*. Librairie Armand Colin.
- Petts G. E. (1984). *Impounded rivers : Perspectives for ecological management*. Wiley.

- Pichot D. (2002). Le moulin et l'encellulement dans l'Ouest français. In Mousnier M. (Éd.), *Moulins et meuniers : Dans les Campagnes européennes du XVIII^e siècle* (p. 111-129). Presses universitaires du Midi.
- Piégay H., Peiry J.-L. et Gazelle F. (2003). Effets des ripisylves sur la dynamique du lit fluvial et de son aquifère. In Piégay H., Pautou G. et Ruffioni C., *Les forêts riveraines des cours d'eau* (p. 94-113). Institut pour le développement forestier.
- Pilotti M., Simoncelli S. et Valerio G. (2014). A simple approach to the evaluation of the actual water renewal time of natural stratified lakes. *Water Resources Research*, 50(4), p. 2830-2849.
- Poirel A., Merle G., Salençon M. J. et Travade, F. (2001). Gestion hydraulique et ressources piscicoles dans les retenues hydroélectriques. In D. Gerdeaux (Éd.), *Gestion piscicole des grands plans d'eau* (p. 3-35). Quae.
- Poole G., Risley J. et Hicks M. (2001). *Spatial and temporal patterns of stream temperature (revised)* (EPA910D0100; p. 33). United States Environmental Protection Agency.
- Powell D. M. (2014). Flow resistance in gravel-bed rivers : Progress in research. *Earth-Science Reviews*, 136, 301-338.
- Power G., Brown R. S. et Imhof J. G. (1999). Groundwater and fish—Insights from northern North America. *Hydrological Processes*, 13(3), p. 401-422.
- Prestegard K. L. (1983). Bar resistance in gravel bed streams at bankfull stage. *Water Resources Research*, 19(2), p. 472-476.
- Recking A., Richard D. et Degoutte G. (2013). *Torrents et rivières de montagne : Dynamique et aménagement*. Editions Quae.
- Reggiori D. (2008). *L'acqua nel sottosuolo* (Vol. 1). Il Rostro.
- Rickard C., Day R. et Purseglove J. (2003). *River Weirs—Good Practice Guide*. Environment Agency.
- Riis T., Kelly-Quinn M., Aguiar F. C., Manolaki P., Bruno D., Bejarano M. D., Clerici N., Fernandes M. R., Franco J. C., Pettit N., Portela A. P., Tammeorg O., Tammeorg P., Rodríguez-González P. M. et Dufour, S. (2020). Global Overview of Ecosystem Services Provided by Riparian Vegetation. *BioScience*, 70(6), p. 501-514.
- Rivals C. (2000). *Le moulin et le meunier. Mille ans de meunerie en France et en Europe* (Vol. 1 & 2). Empreinte Éditions.
- Rougerie G. (2003). *Géographie des marges*. L'Harmattan.
- Salvador P.-G., Arnaud-Fassetta G., Castanet C., & Ferdinand L. (2009). La dynamique fluviale holocène et géoarchéologie en milieu fluvial. In Arnaud-Fassetta G. et Laganier R., *Les géographies de l'eau : Processus, dynamique et gestion de l'hydrosystème* (p. 303). L'Harmattan.
- Salvador P.-G., Berger J.-F., Gaucher G. et Bravard J.-P. (2009). Dynamique fluviale et anthropisation d'un fond de vallée : L'exemple de l'auto-capture du Rhône dans la

- plaine des Basses Terres dauphinoises (Ain, Isère, France). *Revue du Nord*, 14, p. 101-110.
- Schmid-Araya J. M. (1997). Temporal and spatial dynamics of meiofaunal assemblages in the hyporheic interstitial of a gravel stream. In Gibert J., Mathieu J. et Fournier F. (Éds.), *Groundwater/Surface Water Ecotones : Biological and Hydrological Interactions and Management Options* (p. 29-36). Cambridge University Press.
- Smith K., Lavis M. E. et Tower L. (1975). Environmental influences on the temperature of a small upland stream. *Oikos*, 26, p. 228-236.
- Souchon Y. et Nicolas V. (2011). *Barrages et Seuils : Principaux impacts environnementaux*. 28 p.
- Story A., Moore R. D. et Macdonald J. S. (2003). Stream temperatures in two shaded reaches below cutblocks and logging roads : Downstream cooling linked to subsurface hydrology. *Canadian Journal of Forest Research*, p. 1383-1396.
- Straškraba M., Tundisi J. G. et Duncan A. (1993). State-of-the-art of reservoir limnology and water quality management. In Straškraba M., Tundisi J. G. et Duncan A. (Éds.), *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management* (p. 213-288). Springer Netherlands.
- Straskraba M., Tundisi J. G. et Duncan A. (Éds.). (2013). *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management*. Springer Science & Business Media.
- Strayer D. L., Power M. E. Fagan W. F., Pickett S. T. A. et Belnap J. (2003). A Classification of Ecological Boundaries. *BioScience*, 53(8), p. 723-729.
- Sullivan K. et Adams T. N. (1991). *The physics of stream heating : An analysis of temperature patterns in stream environments based on physical principles and field data* (N° 044-5002.90/2). Technology Center.
- Sverdrup H. U. (1942). *Oceanography for Meteorologists*. Prentice-Hall.
- Taillet R., Villain L. et Febvre, P. (2018). *Dictionnaire de physique : Plus de 6500 termes, nombreuses références historiques, des milliers de références bibliographiques*. De Boeck supérieur.
- Tanase I. et Zaharia L. (2015). Impact of the reservoirs on the river low flow and measures to mitigate the negative effects. *Aerul si Apa. Componente ale Mediului*, p.332-339.
- Thornton K. W. (1990). Perspectives on reservoir limnology. In Thornton K. W., Kimmel B. L. et Payne F. E. (Éds.), *Reservoir Limnology : Ecological Perspectives*. John Wiley & Sons.
- Thornton K. W., Kimmel B. L. et Payne F. E. (Éds.). (1990). *Reservoir Limnology : Ecological Perspectives*. Wiley.
- Tissot L. et Souchon Y. (2010). Synthèse des tolérances thermiques des principales espèces de poissons des rivières et fleuves de plaine de l'ouest européen. *Hydroécologie Appliquée*, 17, 17-76.

- Torgersen C. E., Faux R. N., McIntosh B. A., Poage N. J. et Norton D. J. (2001). Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. *Remote Sensing of Environment*, 76(3), p. 386-398.
- Touchart L. (2001). *De la température de l'eau à la géographie des lacs* [Thèses de HDR, Limoge].
- Touchart L. (2002). *Limnologie physique et dynamique : Une géographie des lacs et des étangs*. L'Harmattan.
- Touchart L. (2007a). La définition de l'étang en géographie limnologique. In Touchart L. (Éd.), *Géographie de l'étang : Des théories globales aux pratiques locales* (p. 13-45). L'Harmattan.
- Touchart, L. (2007b). L'étang et la température de l'eau : Un ensemble d'impacts géographiques. In L. Touchart (Éd.), *Géographie de l'étang : Des théories globales aux pratiques locales*. L'Harmattan.
- Touchart L. (2016). Le bilan thermique des étangs : Réflexion épistémologique et application aux étangs limousins. *Annales de géographie*, 708, p. 143-169.
- Touchart L. et Bartout P. (2010). The influence of monk equipped ponds on the quality of basin head streams, the exemple of water temperature in Limousin and Berry (France). *Lakes, Reservoirs and Ponds*, 4, p. 81-108.
- Touchart L. et Bartout P. (2018). Le limnosystème est-il un concept géographique ? *Annales de géographie*, 719(1), p. 29-58.
- Townsend C. R. et Hildrew A. G. (1994). Species traits in relation to a habitat template for river systems. *Freshwater Biology*, 31(3), p. 265-275.
- Tricart, J. (1960). Les types de lits fluviaux. *L'Information Géographique*, 24(5), 210-214. <https://doi.org/10.3406/ingeo.1960.2025>
- Turner L. M. et Erskine W. (1997). Thermal, oxygen and salt stratification in three weir pools on the Nepean River, NSW. *Actes du colloque « Science and technology in the Environmental management of the Hawkesbury-Nepean Catchment »*, p. 87-92.
- Vannote R. L., Minshall G. W., Cummins K. W., Sedell J. R. et Cushing C. E. (1980). The River Continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37, p. 130-137.
- Verneaux J. (1973). *Cours d'eau de Franche-Comté (massif du Jura) : Recherches écologiques sur le réseau hydrographique du Doubs : essai de biotypologie*. Institut des Sciences Naturelles.
- Verneaux J. (1976a). Biotypologie de l'écosystème « eaux courantes ». La structure biotypologie. *Comptes Rendus de l'Académie des sciences*, 283, p. 1663-1666.
- Verneaux J. (1976b). Biotypologie de l'écosystème « eaux courantes ». Les groupements socio-écologiques. *Comptes Rendus de l'Académie des sciences*, 283, p. 1791-1793.

- Verneaux J. (1977a). Biotypologie de l'écosystème « eaux courantes ». Déterminisme approché de la structure biotypologique. *Comptes Rendus de l'Académie des sciences*, 284, p. 77-79.
- Verneaux J. (1977b). Biotypologie de l'écosystème « eaux courantes ». Déterminisme approché de l'appartenance typologique d'un peuplement ichtyologique. 284, p. 675-678.
- Vernon-Harcourt L. F. (1882). *A treatise on rivers and canals*. Oxford University Press.
- Vigreux L. (1888). *Traité théorique et appliqué d'hydraulique appliquée*. Imprimerie E. Bernard et Compagnie.
- Walker J. (2014). *La realtà e i modelli della fisica*. Pearson.
- Ward J. V. (1985). Thermal characteristics of running waters. *Hydrobiologia*, 125(1), p. 31-46.
- Ward J. V., Tockner K., & Schiemer F. (1999). Biodiversity of floodplain river ecosystems : Ecotones and connectivity. *Regulated Rivers: Research & Management*, 15(1-3), p. 125-139.
- Ward J. V., & Wiens, J. A. (2001). Ecotones of riverine ecosystems : Role and typology, spatio-temporal dynamics, and river regulation. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 1, 25-36.
- Wawrzyniak V. (2012). *Étude multi-échelle de la température de surface des cours d'eau par imagerie infrarouge thermique : Exemples dans le bassin du Rhône* [These de doctorat, Lyon 3].
- Wawrzyniak V., Piégay H., Allemand P., Vaudor L. et Grandjean P. (2013). Prediction of water temperature heterogeneity of braided rivers using very high resolution thermal infrared (TIR) images. *International Journal of Remote Sensing*, 34(13), p. 4812-4831.
- Weast R. C. (1975). *Handbook of Chemistry and Physics* (56th Revised edition). CRC Press Inc.
- Weaver J. E. et Albertson, F. W. (1956). *Grasslands of the Great Plains : Their Nature and Use*. Literary Licensing, LLC.
- Webb B. W., & Walling D. E. (1993). Temporal variability in the impact of river regulation on thermal regime and some biological implications. *Freshwater Biology*, 29(1), p. 167-182.
- Webb B. W. et Zhang, Y. (2004). Intra-annual variability in the non-advective heat energy budget of Devon streams and rivers. *Hydrological Processes*, 18(11), p. 2117-2146.
- Webb B. W., & Walling D. (1996). Long-term variability in the thermal impact of river impoundment and regulation. *Applied Geography*, 16(3), p. 211-223.
- Webb B. W., Hannah W., Moore D. M., Brown R. D. et Nobilis, F. (2008). Recent advances in stream and river temperature research. *Hydrological Processes*, 22(7), p. 902-918.
- Webster I. T., Gary J. J., Rod O. L., Bormans M. et Bradford S. S. (1997). *Control strategies for cyanobacterial blooms in weir pools* (N° 119; p. 75). CSIRO Land & Water.

- Wentworth C. K. (1922). A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*, 30(5), p. 377-392.
- Wetzel R. G. (1983). *Limnology*. Saunders.
- Wetzel R. G. (1990). Reservoirs Ecosystems : Conclusion and Speculations. In Thornton K. W., Kimmel B. L. et Payne F. E. (Éds.), *Reservoir Limnology : Ecological Perspectives* (p. 227-238). John Wiley & Sons.
- Whiterod N. et Sherman B. (2012). Environmental Gradients Along a Lowland Weir Pool in the Southern Murray-Darling Basin, Australia. *River Research and Applications*, 28(10), p. 1680-1694.
- Wilhelm F. (1960). Seen als geographisches Forschungsobjekt. *Berichte zur deutschen Landeskunde*, 25, p. 305-321.
- Xylem. (2019). *FlowTracker2 User's Manual 1.6, Software Version 1.6, Firmware Version 1.30*.
http://www.geotechenv.com/Manuals/SonTek_Manuals/sontek_flowtracker2_manual.pdf
- Yang C. T. (1971). Formation of Riffles and Pools. *Water Resources Research*, 7(6), p. 1567-1574.
- Zaharia L. (1998). Tendances dans l'évolution des transferts de matières en suspension, dans l'arc des Subcarpathes, en relation avec les modifications du milieu/Trends in the evolution of the suspended load discharge in the Curvature Sub-Carpathians, in relation to the environmental changes. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4(1), p. 3-15.
- Zaharia L., Ioana-Toroimac G., Moroşanu G.-A., Gălie A.-C., Moldoveanu M., Čanjevac I., Belleudy P., Plantak M., Buzjak N., Bočić N., Legout C., Bigot S. et Ciobotaru, N. (2018). Review of national methodologies for rivers' hydromorphological assessment : A comparative approach in France, Romania, and Croatia. *Journal of Environmental Management*, 217, p. 735-746.
- Zwieniecki M. A. et Newton M. (1999). Influence of Streamside Cover and Stream Features on Temperature Trends in Forested Streams of Western Oregon. *Western Journal of Applied Forestry*, 14(2), p. 106-113.

TABLES

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Les seuils en rivière en France métropolitaine (Réalisation : Francesco Donati).....	20
Figure 2 : Les pressions exercée par un lit fluvialite sur la masse d'eau qu'il contient (Réalisation : Francesco Donati).....	32
Figure 3 : Les forces qui déclenchent l'écoulement des eaux fluviales (Réalisation : Francesco Donati).....	33
Figure 4 : La modalité d'écoulement des eaux au sein d'un chenal fluvialite (Source : Francesco Donati).....	35
Figure 5 : L'échelle granulométrique de Wentworth (Source : Wentworth, 1922).....	38
Figure 6 : Le diagramme de Hjulström (Modifiée par Francesco Donati, à partir de Hjulström (1935).....	41
Figure 7 : Les facteurs qui influent sur la température des cours d'eau (Source : Caissie, 2006).....	44
Figure 8 : La variation de la température de l'eau au cours d'une année dans le Little Southwest Miramichi River et dans le Catamaran Brook (Source : Caissie et al. 2005).....	45
Figure 9 : Les différents strates d'eau dans les lacs et dans les étangs. Les températures qui ont été insérées dans cette image ont été insérées à titre d'exemple (Réalisation : Francesco Donati).....	50
Figure 10 : Les différents profils thermiques que la colonne d'eau d'un plan d'eau peut présenter (Modifié à partir de Touchart, 2007b).....	51
Figure 11 : Les pressions exercée par la cuvette sur la masse d'eau qu'elle contient (Réalisation : Francesco Donati).....	55
Figure 12 : Les forces qui arrêtent l'écoulement du tributaire dans un plan d'eau, dans ce cas dans une retenue (Réalisation : Francesco Donati).....	56
Figure 13 : La conductivité maximale au sein du lac estonien de Nõmme en surface et dans une coupe verticale (Source : Choffel, 2019).....	58
Figure 14 : La zonation thermiques de l'étang de Baerenthal (Source : Choffel, 2019).....	59
Figure 15 : En bas à droite de l'image, la carte des courants de l'étang de Cieux. Dans cette figure on peut également voir la méthodologie qui a servi pour la réalisation de cette carte (Source : Carlini, 2006).....	62
Figure 16 : Le plume de sédiments qui progresse dans l'étang de Baerenthal, un des terrains d'étude de cette recherche (Source : Geoportail.fr).....	65
Figure 17 : La disposition de la vase dans les étangs de Cieux et des Oussines (Source : Carlini, 2006).....	66
Figure 18 : Les différentes conformations que peuvent assumer les limites en nature (Source : Strayer et al. 2003).....	70
Figure 19 : Les différents types d'écotones qui se développent le long de l'axe transversale des fleuves et des rivières (Source : Ward & Wiens (2001).....	71

Figure 21 : Le gradient de salinité de l'estuaire de la Gironde, sous l'effet du cycle crue-étiage (Source : Lobry, 2004).....	76
Figure 22 : La succession seuil-mouille, dans la figure respectivement riffle-pool (Source : Marchetti, 2000).....	77
Figure 23 : Les chaînes de thermomètres que nous avons utilisée dans les retenues de seuil (à gauche). Les thermomètres « HOBO U22-00 » immergés dans l'eau (à droite) (Photos réalisées par Francesco Donati, 2017).....	88
Figure 24 : Le FlowTracker 2 (Source : Sontek).....	90
Figure 25 : La méthode d'échantillonnage de la direction de l'écoulement du FlowTracker 2 (Source : Xylem, 2019).....	91
Figure 26 : La conformation d'une station de mesure pour la mesure du débit grâce à la technique d'exploration du champ de vitesse (Source : Le Coz et al., 2011).....	92
Figure 27 : Le système de vecteurs orientés utilisé pour matérialiser la direction des courants dans les retenues de seuil. À gauche : la réalité de terrain. À droite : la réalité de terrain transformée dans le système de vecteurs. La flèche jaune représente l'orientation du capteur du courantomètre (Réalisation : Francesco Donati).....	93
Figure 28 : Les opérations de mesure de la profondeur du substrat dans l'une des retenues de seuil en étude (Photo de Francesco Donati).....	96
Figure 29 : Le carottier Beeker vide (à gauche) et remplis de sédiments (à droite) (Source : Sedec France).....	97
Figure 30 : La colonne de tamis utilisée pour les analyses granulométriques (Photo réalisée par Francesco Donati, 2019).....	99
Figure 31 : Le seuil en rivière qui forme la retenue de seuil de Saint-Hilaire à Meung sur Loire (Source : Comm.de Comm. Terres du Val de Loire).....	101
Figure 32 : L'ancienne vanne ouvrière du moulin de Saint-Hilaire, aujourd'hui bloquée sur le seuil en rivière principale. Dans la photo on voit également les anciens mécanismes qui permettaient de la manœuvre et l'emplacement de la turbine (Source : Comm.de Comm. Terres du Val de Loire).....	102
Figure 33 : Schéma résumant la disposition des annexes hydrauliques du moulin de Saint-Hilaire (Réalisation : Francesco Donati).....	103
Figure 34 : L'étendue spatiale de la retenue de seuil de Saint-Hilaire. Les traits rouges matérialisent les limites de la retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati ; source : IGN).....	105
Figure 35 : Le bassin versant des Mauves et l'emplacement du seuil en rivière de Saint-Hilaire (Réalisation : Francesco Donati).....	106
Figure 36 : La topographie du bassin versant des Mauves (Réalisation : Francesco Donati).....	106
Figure 37 : La géologie du bassin versant des Mauves (Réalisation : Francesco Donati).....	107
Figure 38 : La perte au feu des sédiments de la retenue de seuil de Saint-Hilaire à l'Université de Tallinn en Estonie (Photo réalisée par Francesco Donati).....	108

Figure 39 : Schéma résumant la disposition des annexes hydrauliques qui caractérisent la retenue de seuil de Baerenthal (Réalisation : Francesco Donati).....	110
Figure 40 : L'étendue de la retenue de seuil de Baerenthal. Dans le graphique les traits rouges matérialisent les limites de la retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati ; source : IGN).....	111
Figure 41 : Le bassin versant de la Zinsel du Nord et l'emplacement de la retenue de seuil en étude (Réalisation : Francesco Donati).....	112
Figure 42 : La topographie du bassin versant de la Zinsel du Nord (Réalisation : Francesco Donati).....	113
Figure 43 : La géologie du bassin versant de la Zinsel du Nord (Réalisation : Francesco Donati).....	113
Figure 44 : Le cratère de la bombe qui a créé une sorte de mouille artificielle à l'amont de la retenue de seuil de Baerenthal dans une photo aérienne du 1946 (Source : IGN).....	114
Figure 45 : Le contexte hydrologique de la retenue de seuil de Baerenthal (Réalisation : Francesco Donati).....	116
Figure 46 : Le seuil en rivière du moulin de Thévalles (Photo réalisée par Francesco Donati, 2020).....	116
Figure 47 : Le moulin de Thévalles (à gauche) et le château homonyme qui le surplombe (Photo réalisée par Francesco Donati, 2020).....	117
Figure 48 : Schéma résumant la disposition des annexes hydrauliques du moulin de Thévalles (Réalisation : Francesco Donati).....	118
Figure 49 : L'étendue spatiale de la retenue de seuil Thévalles. Les traits rouges matérialisent les limites de la retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati ; source : IGN).....	119
Figure 50 : Le bassin versant de l'Erve et l'emplacement de la retenue de seuil en étude (Réalisation : Francesco Donati).....	120
Figure 51 : La topographie du bassin versant de l'Erve (Réalisation : Francesco Donati).....	121
Figure 52 : La géologie du bassin versant de l'Erve (Réalisation : Francesco Donati).....	121
Figure 53 : Les peintures rupestres dans l'une des grottes du canyon de Saulges, en proximité de la retenue de seuil de Thévalles (Source : Musée de Saulges).....	122
Figure 54 : La station météo installée en proximité de la retenue de seuil de Thévalles (Photo relaissée par Francesco Donati).....	124
Figure 55 : Le gradient thermique entre la surface et le fond à l'aval de la retenue de seuil de Saint-Hilaire pendant toute la période d'étude (Réalisation : Francesco Donati).....	126
Figure 56 : Le Δ° entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'aval de la retenue de seuil de Saint-Hilaire au cours de toute la période d'étude.....	128
Figure 57 : Le gradient thermique entre la surface et le fond à l'amont de la retenue de seuil de Saint-Hilaire pendant toute la période d'étude (Réalisation : Francesco Donati).....	128

Figure 58 : Le Δ° entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'amont de la retenue de seuil de Saint-Hilaire au cours de toute la période d'étude (Réalisation : Francesco Donati)	130
Figure 59 : L'évolution de la température de l'eau et de l'air le 05/08/2018 à l'aval de la retenue de seuil de Saint-Hilaire (Réalisation : Francesco Donati).....	131
Figure 60 : L'évolution de la température de l'eau et de l'air à l'amont de la retenue de seuil de Saint-Hilaire le 11/07/2018 (Réalisation : Francesco Donati).....	132
Figure 61 : Les vecteurs qui matérialisent la direction de l'écoulement dans les différents transects à l'intérieur de la retenue de seuil de Saint-Hilaire (Réalisation : Francesco Donati).....	133
Figure 62 : Le nombre de Froude moyen dans tous les transects qui subdivisent le terrain d'étude de Saint-Hilaire ; les traits rouges représentent les limites de la retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati).....	135
Figure 63 : L'épaisseur moyenne de la couche de sédiments qui recouvre les fonds de la retenue de seuil de Saint-Hilaire, les traits rouges représentent les limites de la retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati).....	136
Figure 64 : L'épaisseur moyenne de la couche de sédiments qui recouvre les fonds de la retenue de seuil de Saint-Hilaire ; les traits rouges représentent les limites de la retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati).....	137
Figure 65 : La retenue de seuil de Saint-Hilaire sur le point de déborder pendant la crue de février 2020 (Photo réalisée par Francesco Donati).....	138
Figure 66 : La carotte prélevée dans le transect T5. La ligne verte matérialise l'horizon organique composé de débris végétaux, celle jaune celui mixte composé de débris végétaux/minéraux et celui gris l'horizon composé de débris minéraux (Photo réalisée par Francesco Donati).....	139
Figure 67 : La carotte prélevée dans le transect T12. La ligne verte matérialise l'horizon organique composé de débris végétaux, celle jaune celui mixte composé de débris végétaux/minéraux et celui gris l'horizon composé de débris minéraux (Photo réalisée par Francesco Donati).....	139
Figure 68 : La granulométrie des échantillons collectés dans la retenue de seuil de Saint-Hilaire (Réalisation : Francesco Donati).....	140
Figure 69 : Le gradient thermique entre la surface et le fond de la retenue de seuil de Baerenthal pendant toute la période d'étude (Réalisation : Francesco Donati).....	142
Figure 70 : Le Δ° entre la surface et le fond de la colonne d'eau de la retenue de seuil de Baerenthal au cours de toute la période d'étude.....	143
Figure 71 : L'évolution de la température de l'eau et de l'air dans la retenue de seuil de Baerenthal le 27/07/2018 (Réalisation : Francesco Donati).....	144
Figure 72 : Le gradient thermique entre la surface et le fond de l'étang de Baerenthal entre le 02/02/2018 et le 17/10/2018 (Réalisation : Francesco Donati).....	146
Figure 73 : Le Δ° entre la surface et le fond de la colonne d'eau de de l'étang de Baerenthal entre 02/02/2018 et le 17/10/2018 (Réalisation : Francesco Donati).....	147

Figure 74 : Les vecteurs qui matérialisent la direction de l'écoulement dans les différents transects à l'intérieur de la retenue de seuil de Baerenthal, dessinés à partir des angles des vitesses moyens mesurés (Réalisation : Francesco Donati).....	148
Figure 75 : Le nombre de Froude moyen dans tous les transects qui subdivisent le terrain d'étude de Baerenthal ; les traits rouges représentent les limites de la retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati).....	149
Figure 76 : La compétence de l'écoulement dans le site de Baerenthal, selon le diagramme de Hjulström. En marron la vitesse moyenne dans la retenue de seuil ; en rouge celle dans les transects à son amont (Réalisation : Francesco Donati).....	150
Figure 77 : L'épaisseur moyenne de la couche de sédiments qui recouvre les fonds de la retenue de seuil de Baerenthal, les traits rouges représentent les limites de la retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati).....	151
Figure 78 : La carotte prélevée dans le transect T10. La ligne verte matérialise l'horizon principalement organique et celle grise celui minéraux (Photo réalisée par Francesco Donati).....	152
Figure 79 : La granulométrie des échantillons collectés dans la retenue de seuil de Baerenthal (Réalisation : Francesco Donati).....	152
Figure 80 : À gauche : la crue qui a touché le terrain d'étude de Thévalles en décembre 2019. À droite : une des chaînes des thermomètres coincées dans les vannes ouvrières du moulin de Thévalles (Photos réalisées par P-H. de Vitton).....	153
Figure 81 : Le gradient thermique entre la surface et le fond à l'aval de la retenue de seuil de Thévalles pendant toute la période d'étude (Réalisation : Francesco Donati).....	155
Figure 82 : Le Δ° (en $^\circ\text{C}$) entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'aval de la retenue de seuil de Thévalles au cours de toute la période d'étude.....	156
Figure 83 : Le gradient thermique entre la surface et le fond à l'amont de la retenue de seuil de Thévalles pendant toute la période d'étude (Réalisation : Francesco Donati).....	157
Figure 84 : Le Δ° (en $^\circ\text{C}$) entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'amont de la retenue de seuil de Thévalles au cours de toute la période d'étude(Réalisation : Francesco Donati).....	158
Figure 85 : L'évolution de la température de l'eau et de l'air et de l'eau à l'aval de la retenue de seuil de Thévalles entre le 24/05/2019 et le 30/06/2019 (Réalisation : Francesco Donati).....	161
Figure 86 : L'évolution de la température de l'eau et du débit à l'aval de la retenue de seuil de Thévalles entre le 30/05/2019 et le 04/06/2019 (Réalisation : Francesco Donati).....	162
Figure 87 : L'évolution de la température de l'eau à l'amont de la retenue de seuil de Thévalles le 22/06/2020 (Réalisation : Francesco Donati).....	163
Figure 88 : L'évolution de la température de l'eau à l'amont de la retenue de seuil de Thévalles le 26 et 27/06/2020 (Réalisation : Francesco Donati).....	164
Figure 89 : L'évolution de la température de l'eau à l'aval de la retenue de seuil de Thévalles le 15/09/2020 (Réalisation : Francesco Donati).....	165
Figure 90 : La granulométrie des échantillons collectés dans la retenue de seuil de Thévalles (Réalisation : Francesco Donati).....	167

Figure 91 : L'évolution de la température moyenne de l'eau à l'amont et à l'aval de l'étang de Baerenthal : la retenue se situe dans le deuxième point à l'aval du plan d'eau (Source : Choffel, 2019).....	176
Figure 92 : L'état d'une ancienne planche de la roue du moulin de Thévalles (Photo réalisée par Francesco Donati).....	183
Figure 93 : L'écotone retenue de seuil (Réalisation : Francesco Donati).....	191
Figure 94 : Le fonctionnement d'un écotone retenu de seuil formée par un seuil en rivière fixe (Réalisation : Francesco Donati).....	195
Figure 95 : Le fonctionnement d'un écotone retenu de seuil formée par un seuil en rivière équipé d'éléments mobiles (Réalisation : Francesco Donati).....	197
Figure 96 : Le milieux aquatiques terrestre disposés selon un gradient de conditions abiotiques (Réalisation : Francesco Donati).....	199
Figure 97 : Le gradient de milieux qu'on retrouve dans le bassin versant du Rhône (Réalisation : Francesco Donati).....	201
Figure 98 : Le gradient de milieux qu'on retrouve dans le bassin versant du Cosson (Réalisation : Francesco Donati).....	201

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Le gradient thermique verticale moyen, maximale positif et maximale négatif entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'aval de la retenue de seuil de Saint-Hilaire au cours des saisons.....	126
Tableau 2 : Le Δ° moyen, minimale et maximale entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'aval de la retenue de seuil de Saint-Hilaire au cours des saisons.....	127
Tableau 3 : Le gradient thermique verticale moyen, maximale positif et maximale négatif (en $^\circ\text{C}$) entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'amont de la retenue de seuil de Saint-Hilaire au cours des saisons.....	128
Tableau 4 : Le Δ° moyen, minimale et maximale entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'amont de la retenue de seuil de Saint-Hilaire au cours des saisons.....	129
Tableau 5 : L'amplitude thermique moyenne (en $^\circ\text{C}$) aux différents niveaux de la colonne d'eau à l'aval de la retenue de seuil de Saint-Hilaire.....	130
Tableau 6 : L'amplitude thermique moyenne (en $^\circ\text{C}$) aux différents niveaux de la colonne d'eau à l'amont de la retenue de seuil de Saint-Hilaire.....	130
Tableau 7 : L'angle de vitesse moyen dans tous les transects qui subdivisent le terrain d'étude de Saint-Hilaire.....	134
Tableau 8 : L'épaisseur moyen de la couche de sédiments dans la retenue de seuil de Saint-Hilaire avant et après la crue de février 2020.....	137
Tableau 9 : Le pourcentage de matière organique dans certains échantillons prélevés dans la retenue de seuil de Saint-Hilaire.....	139
Tableau 10 : Le gradient thermique verticale moyen, maximale positif et maximale négatif entre la surface et le fond de la colonne d'eau de la retenue de seuil de Baerenthal au cours des saisons.....	141
Tableau 11 : Le Δ° moyen, minimale et maximale entre la surface et le fond de la colonne d'eau de la retenue de seuil de Baerenthal au cours des saisons.....	142
Tableau 12 : L'amplitude thermique moyenne (en $^\circ\text{C}$) aux différents niveaux de la colonne d'eau dans la retenue de seuil de Baerenthal.....	144
Tableau 13 : Le gradient thermique verticale moyen, maximale positif et maximale négatif entre la surface et le fond de la colonne d'eau de l'étang de Baerenthal au cours des saisons.....	145
Tableau 14 : Le Δ° moyen, minimale et maximale entre la surface et le fond de la colonne d'eau de l'étang de Baerenthal au cours des saisons.....	146
Tableau 15 : L'amplitude thermique moyenne (en $^\circ\text{C}$) aux différents niveaux de la colonne d'eau de l'étang de Baerenthal.....	147
Tableau 16 : L'angle de vitesse moyen dans tous les transects qui subdivisent le terrain d'étude de Baerenthal.....	149

Tableau 17 : Le gradient thermique verticale moyen, maximale positif et maximale négatif (en °C) entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'aval de la retenue de seuil de Thévalles au cours des saisons.....	155
Tableau 18 : Le Δ° moyen, minimale et maximale (en °C) entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'aval de la retenue de seuil de Thévalles au cours des saisons.....	156
Tableau 19 : Le gradient thermique verticale moyen, maximale positif et maximale négatif (en °C) entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'amont de la retenue de seuil de Thévalles au cours des saisons.....	157
Tableau 20 : Le Δ° moyen, minimale et maximale (en °C) entre la surface et le fond de la colonne d'eau à l'amont de la retenue de seuil de Thévalles au cours des saisons.....	158
Tableau 21 : L'amplitude thermique moyenne (en °C) aux différents niveaux de la colonne d'eau à l'aval de la retenue de seuil de Thévalles.....	159
Tableau 22 : L'amplitude thermique moyenne (en °C) aux différents niveaux de la colonne d'eau à l'amont de la retenue de seuil de Thévalles.....	159
Tableau 23 : Le coefficient de corrélation entre les différentes variables climatiques et la température de l'eau à l'aval de retenue de seuil de Thévalles.....	159

Francesco DONATI

La nature des retenues de seuil : une question limnologique?

Étude hydrodynamique, thermique et sédimentaire (Loiret, Moselle, Mayenne)

Résumé : Au cours des dernières décennies, les seuils en rivière ont bénéficié d'une attention particulière de la part des gestionnaires français des cours d'eau, qui les ont effacés en grand nombre, en raison des impacts négatifs qu'ils exerceraient sur les milieux fluviaux. Parmi eux, il y a la transformation des tronçons des cours d'eau qui se trouvent à l'amont de ces ouvrages hydrauliques en plans d'eau, qui présenteraient le fonctionnement typique des milieux lenticques. Toutefois, la nature des retenues de seuil est très méconnue, ayant été très peu étudiée au fil des années, tant que à aujourd'hui beaucoup d'interrogations existe à propos des caractéristiques de ces environnements. Ainsi, l'objectif de cette recherche est de combler ce vide, améliorant les connaissances sur ces milieux aquatiques artificiels et comprenant notamment si leur fonctionnement est similaire à celui des milieux lenticques. Pour cette raison, dans ce travail les retenues de seuil ont été abordées avec un regard limnologique, utilisant des techniques couramment utilisées pour étudier les environnements d'eau stagnante. Au centre de cette étude a été mis le fonctionnement abiotique de ces milieux et plus précisément celui hydrodynamique, celui thermique et celui sédimentaire. Les résultats de cette recherche montrent qu'une simple opposition entre milieux lotiques et lenticques ne peut pas suffire pour répondre à cette problématique, car ils mettent en évidence que les retenues de seuil n'appartiennent à aucune de ces deux catégories de milieu aquatique : la thèse conclut en proposant une nouvelle typologie de ces milieux hybrides.

Mots clés : Retenue de seuil, Seuil en rivière, Fonctionnement abiotique des milieux aquatiques, Lotique/Lenticque, Nouveaux écosystèmes, Limnologie.

The nature of weir pools : a limnological question?

Hydrodynamic, thermal and sedimentary study (Loiret, Moselle, Mayenne)

Abstract : In recent decades, weirs received special attention from French river administrators, who erased a lot of them because of some negative impacts they would have on fluvial environments. One of these effects is the transformation into bodies of water of the river sections found upstream of these hydraulic structures, which would present the typical functioning of lentic environments. However, the nature of weirs is poorly understood, having been little studied over the years, so much that many questions about the characteristics of these environments remain today. Thus, the purpose of the study is to answer these questions, in order to improve our knowledge of these artificial aquatic environments and understand if they function similarly to lentic environments. In this context weir pools were studied from a limnological perspective, using techniques commonly used to analyse stagnant water environments. The study focuses in particular on abiotic functioning of these environments and more precisely the hydrodynamic, thermal and sedimentary ones. The results of this research show that a mere opposition between lotic and lentic environments is insufficient to address the issue, because weir pools do not belong to either of these two categories of aquatic environments: the thesis concludes proposing a new typology of these hybrid environments.

Keywords: Weir pool, Weirs, Abiotic operation of aquatic environments, Lotic/Lentic, Novel ecosystems, Limnology



Laboratoire CEDETE, EA 1210,

10 Rue de Tours, - BP 46527

45065 Orléans CEDEX 2

