Lac de l'Abbaye (Jura)

Suivi piscicole

Jean-Baptiste Fagot
Fédération du Jura pour la Pêche
et la Protection des Milieux Aquatiques

Version finale
2 mars 2023

Remerciements

Fédération du Jura pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique

Corinne Esseiva
Nadège Pommier
Mehdi El Bettah
Adrien Lavigne
Fabien Millet
Philippe Mougin
Stéphane Pizzetti
Valéry Recouvreux
Jean-Baptiste Fagot (rédacteur et rapporteur)

Bureau d'études Téléos et partenaires

Fanny Poulleau
Hervé Découcière
François Degiorgi
Jonathan Paris
Guy Périat
Daniel Schlunke
Pascal Vonlanthen

OFB

Manuel Barbier
Sylvain Besson
Philippe Chanteloube
Pascal Compagnat
Guy Durand
Jean-Louis Garot
Albin Liborio
Éric Moreau
Bernard Vignon
Emmanuel Vilquin

Agence de l'eau RMC

Valérie Paul
Sébastien Canault
Loïc Imbert

Université de Franche-Comté

Valentin Essert
Laurent Millet

Bénévoles, propriétaires et acteurs locaux

Fabienne Lacroix
Christian Bruneel
Alain Piot
Christian Piot
Yannick Schweitzer
Les autres bénévoles qui ont pu nous aider lors démaillage

1 Résumé

Le lac de l'Abbaye offre un cadre naturel et paysager splendide au sein du Grandvaux. Il constitue également la tête de bassin d'un important hydrosystème souterrain karstique, dont l'exurgence a lieu au niveau de la source de l'Enragé, dans la vallée de la Bienne.

Des activités humaines engendrent la présence d'une très importante quantité de matières organiques dans les sédiments du lac, épuisant l'oxygène dissous présent dans la colonne d'eau. Par ailleurs, l'apport d'eaux non épurées entraînent la présence de molécules indésirables dans des hydrosystèmes naturels, dont les sources ne sont pas formellement identifiées.

D'anciens travaux d'exploitation de la tourbe et de drainage de la tourbière située en rive nord ont eu pour effet de réduire fortement les habitats naturels de nombreuses espèces vivantes du fait d'une déstructuration et/ou d'un caractère moins humide. Les capacités de stockage en eau et d'auto-épuration ont également été altérées.

La gestion du niveau du plan d'eau constitue également un enjeu majeur de la préservation de la qualité de l'eau et des habitats. Celle-ci s'organise autour de la gestion de la vanne située à l'exutoire du lac, et également en lien avec les prélèvements pouvant être réalisés au titre de l'alimentation en eau potable.

Le peuplement piscicole observé présente une situation défavorable dans le temps, avec des limitations quantitatives mais également en matière de composition. La dominance d'espèces piscicoles ubiquistes est une conséquence de la trajectoire évolutive du plan d'eau.

Afin de maintenir et/ou de restaurer le fonctionnement écologique de cet ensemble de milieux naturels (lac, zones humides, cours d'eau), il apparaît indispensable d'engager un ambitieux programme de travaux de reconquête. Cette démarche doit passer par un éventail d'opérations complémentaires telles que la restauration physique des hydrosystèmes associés, l'évolution de certaines pratiques sur le territoire et/ou d'aménagements de l'espace, et la recherche de nouvelles clés de compréhension des fonctionnements écologiques actuels.

Ces actions opérationnelles doivent être accompagnées par la mise en œuvre et/ou par la poursuite de mesures d'acquisition de connaissance, de suivi et de gestion, afin de pouvoir en contrôler l'efficacité et les éventuelles limitations.C'est seulement à travers ces opérations complémentaires et nécessairement concertées que l'environnement du lac de l'Abbaye avancera vers une amélioration écologique, donc paysagère, culturelle et sociale.

Table des matières

1 Résumé **4**

2 Contexte et objectifs **8**
2.1 Contexte 8
2.2 Objectifs 9

3 Principales observations **10**
3.1 Peuplements piscicoles 10
3.1.1 Méthodes d'investigation 10
3.1.2 Évolution historique 14
3.1.3 Répartition 17
3.2 Étude des milieux 20
3.2.1 Cartographie de l'espace lacustre 20
3.2.2 Variations du niveau du lac 22
3.2.3 Physico-chimie des eaux 25

4 États des lieux **30**

5 Propositions d'action **32**
5.1 Usages sur le bassin versant 32
5.2 Gestion 32
5.3 Aménagement 33
5.4 Suivi 33
5.5 Connaissance 33
5.6 Synthèse 34

6 Conclusion **35**

7 Bibliographie **36**

8 Annexes **45**
.1 Informations techniques 46

Acronymes

AAPPMA Association Agréée pour la Pêche et la Protection des Milieux Aquatiques

AEP Alimentation en Eau Potable

ARS Agence Régionale de Santé

BLO BLOc

BRA BRAnchage

BRO Brochet

CEMAGREF CEntre national du Machinisme Agricole du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

CLC Corine Land Cover

CPUE Capture Par Unité d'Effort

DCE Directive Cadre sur l'Eau

DHFF Directive Habitats-Faune-Flore

ECD Échantillonnage Continu par Distance

EEE Espèce Exotique Envahissante

ETM Élément Trace Métallique

FDAAPPMA Fédération Départementale des Associations Agréées pour la Pêche et la Protection des Milieux Aquatiques

FJPPMA Fédération du Jura pour la Pêche et la Protection des Milieux Aquatiques

FNM Fond Nu Minéral

GAL Galet

GAR Gardon

GRA GRAvier

HAP Hydrocarbure Aromatique Polycyclique

HEL HÉLophyte

HYF HYdrophyte Flottant
HYI HYdrophyte immergé

IBL Indice Biotique Lacustre

LIFE L'Instrument Financier pour l'Environnement

MES Matière En Suspension

NGF Nivellement Général de la France

OFB Office Français de la Biodiversité
ONEMA Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

PCB PolyChloroBiphényle
PER Perche
PES Perche soleil

RKM Ressource Karstique Majeure
ROT Rotengle

SAPL Structure Associative de Pêche de Loisir
SDAGE Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SIC Site d'Intérêt Communautaire
SIE Système d'Information sur l'Eau
SIEG Syndicat Intercommunal des Eaux du Grandvaux
SIG Système d'Informations Géographiques
SRAE Service Régional d'Aménagement des Eaux

TAN Tanche

2 Contexte et objectifs

2.1 Contexte

Selon le code de l'environnement, les Structures Associatives de Pêche de Loisir (SAPL) sont chargées de mettre en place un plan de gestion pour les eaux dont elles ont la charge en contrepartie du droit de pêche. L'objectif est d'assurer une gestion durable de l'exploitation des milieux aquatiques, afin notamment de préserver leur biodiversité, conformément aux directives européennes et à la législation nationale en la matière (*Directive 2000/60/CE Du Parlement Européen et Du Conseil Du 23 Octobre 2000 Établissant Un Cadre Pour Une Politique Communautaire Dans Le Domaine de l'eau* 2003 - *Loi 2006-1772 Du 30 Décembre 2006 Sur l'eau et Les Milieux Aquatiques* 2006).

Pour ce faire, une connaissance approfondie de l'état de conservation du patrimoine aquatique est indispensable. Il convient en effet de séparer les secteurs non perturbés, pour lesquels une conservation s'impose, des zones dégradées à restaurer.

Pour les eaux courantes, de nombreux outils administratifs parallèles (Contrats de rivière, Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), programme européens Natura2000 / L'Instrument Financier pour l'Environnement (LIFE), etc.) contribuent à atteindre ces objectifs. Les exemples régionaux sont légions, ce qui réjouit nos fédérations locales : contrats territorial Haute-Vallée de l'Ain/Orbe, Seille, Doubs, Projet LIFE « Tourbières du Massif du Jura », ou encore « Ruisseaux de tête de bassin et faune patrimoniale associée ».

En revanche, alors que leur intérêt halieutique est hautement prisé, force est de constater que les plans d'eau restent plus que jamais le parent pauvre de la politique régionale en matière de protection de l'environnement aquatique. Si leur qualité d'eau est largement suivie dans le cadre de l'Alimentation en Eau Potable (AEP) par l'Agence Régionale de Santé (ARS), il n'en va pas de même de leurs communautés biologiques ni de leur qualité habitationnelle. Seules quelques mesures ponctuelles, pour l'essentiel issues des travaux de l'Université de Franche-Comté ou de l'Office Français de la Biodiversité (OFB), sont disponibles. Elles ne suffisent malheureusement pas à inscrire au plan de gestion un panel d'actions efficaces visant la sauvegarde et l'exploitation durable des eaux stagnantes de la montagne jurassienne.

Il faut également noter que l'application du suivi dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) sur les plans d'eau supérieurs à 50 hectares ne permettra vraisemblablement pas non plus d'émettre des propositions objectives pouvant être mises en œuvre par les fédérations de pêche dans le cadre d'un plan de gestion. En effet, à titre d'exemple pour les poissons, le protocole CEN choisi ne tient compte ni des habitats en présence ni de leur état de conservation. Les données « lacs » issues de la DCE sont donc pour l'essentiel purement descriptives et ne permettront pas d'élucider les causes des dysfonctionnements et donc de proposer des solutions concrètes de réhabilitation.

Ainsi, afin de profiter d'une manière optimale des informations issues de la DCE, d'étendre cet état des lieux aux plans d'eau inférieurs à 50 hectares dont le droit de pêche est accordé à des Associations Agréées pour la Pêche et la Protection des Milieux Aquatiques (AAPPMA) ou aux Fédérations Départementales des Associations Agréées pour la Pêche et la Protection des Milieux Aquatiques (FDAAPPMA) du Doubs et du Jura et de répondre de par la même aux exigences du code de l'environnement tout en promouvant le loisir pêche, les deux fédérations précédemment citées ont décidé, dans le cadre du renouvellement en cours des plans de gestion piscicole (Philot 2021), de s'associer et de s'intéresser activement aux 9 lacs naturels les plus importants de Franche-Comté :

- Département du Doubs : Les lacs de Remoray, Saint-Point et de l'Entonnoir.
- Département du Jura : les lacs de Clairvaux, Ilay, Chalain, Bonlieu, des Rousses et du Val.

Le présent document concerne le lac de l'Abbaye. Celui-ci a été intégré à la démarche précédemment détaillée du fait de son statut de « captage prioritaire » au titre du SDAGE.

2.2 Objectifs

Le présent projet d'étude se fixe les objectifs :

- de réaliser un diagnostic de l'état de conservation des peuplements piscicoles du lac de l'Abbaye ;
- de synthétiser et d'interpréter les données disponibles permettant de comprendre la composition des peuplements.

Ceci passe par la mise en place de différents sous-objectifs plus opérationnels :

- décrire l'état de conservation et l'évolution d'une communauté biologique intégratrice : les poissons,
- interpréter ces résultats à l'aide de paramètres mésologiques, ce qui implique :
  - d'étudier la qualité morphologique et habitationnelle,
  - d'étudier la qualité physico-chimique de l'eau (grâce aux données du suivi DCE),
  - d'évaluer l'évolution quantitative de la ressource en eau.
- intégrer ces différents résultats dans un document de synthèse de type diagnostic, accompagné d'un Système d'Informations Géographiques (SIG).

3 Principales observations

Les données collectées au cours de ce suivi, ainsi que ce rapport, ont été produits via le programme R (R Core Team 2019) à travers RStudio (RStudio Team 2019), couplés à différents packages (Wilke 2019 ; Grolemund et Wickham 2011 ; Kahle et Wickham 2013 ; Wickham et al. 2007 ; Wickham et al. 2011 ; Wickham 2009 ; Wickham, François et al. 2019 ; Slowikowski 2019 ; Auguie 2017 ; Xie 2019 ; Wickham et Bryan 2019 ; Bivand, Keitt et Rowlingson 2017 ; Wickham 2018a ; Wickham et Henry 2019 ; Dahl 2019 ; Wickham 2017 ; Wickham et Ruiz 2019 ; Dunnington et Ruiz 2018 ; Pebesma 2018 ; Wickham 2018b ; Pebesma, Mailund et Hiebert 2016). QGIS, PostgreSQL et PostGIS ont également été utilisés (QGIS Development Team 2019 ; PostgreSQL Global Development Group 2017 ; *PostGIS* 2017).

3.1 Peuplements piscicoles

L'ichtyofaune constitue un outil indispensable à l'étude des milieux aquatiques, dont l'association d'espèces et leur densité est caractéristique d'un type de milieu et de son état général (Jean Verneaux 1980). Ceci justifie l'intérêt d'étudier cette communauté en premier lieu, dans le lac à proprement parler, mais également dans ses tributaires et son émissaire.

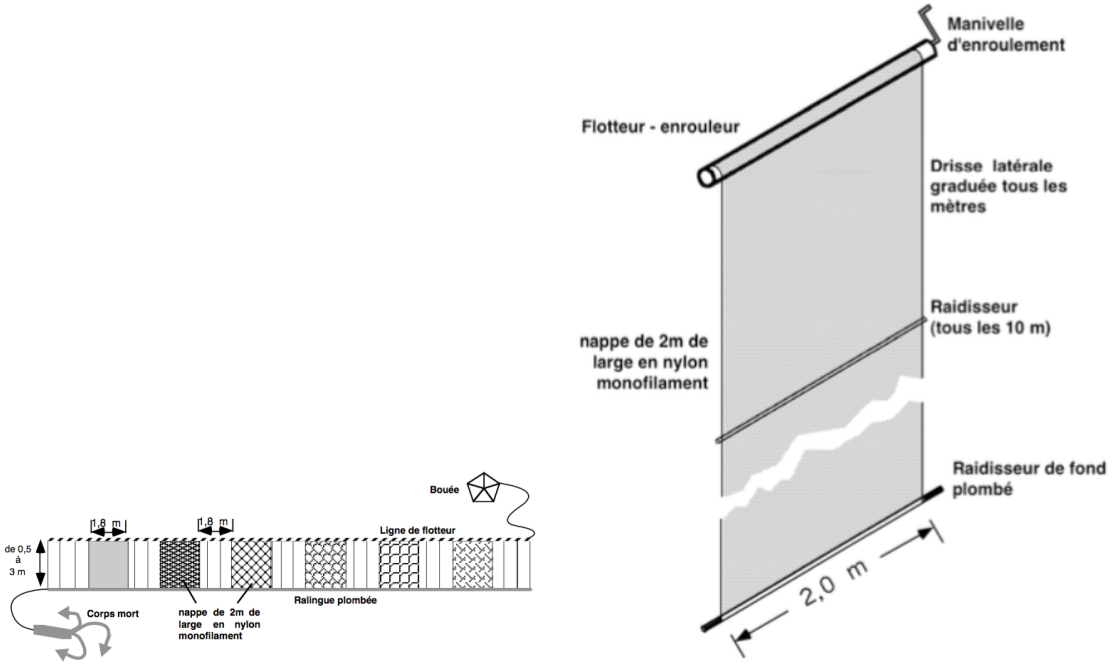
3.1.1 Méthodes d'investigation

Idéalement, 2 à 4 campagnes d'échantillonnage par lac devraient être réalisées pour suivre l'évolution des peuplements au fil des saisons. Toutefois, les coûts et la lourdeur de mise en place d'un tel dispositif d'échantillonnage sont trop élevés. C'est pourquoi l'échantillonnage complet de l'**ichytofaune lacustre** s'est limité à une seule campagne, réalisée en fin de stratification estivale et hors période de reproduction. En effet, en été et au début de l'automne, l'activité de l'ichtyofaune bat son plein. L'ensemble des espèces présentes est donc susceptible d'être capturé par les techniques passives des filets maillants. En outre, cette période correspond à la phase critique de survie de l'ichtyofaune en cas de dysfonctionnement lacustre. Cet élément est primordial dans le cadre de la diagnose écologique du lac.

Trois protocoles d'échantillonnage piscicole sont à mettre en œuvre de manière simultanée concernant lac à proprement parler :

— Deux à **filets multi-maille** : le protocole DCE/CEN (AFNOR 2005), mis en œuvre par l'OFB, ainsi que le protocole dit des filets verticaux (Degiorgi, Raymond et Grandmottet 2003, voir figure 3.1), mis en œuvre par la Fédération du Jura pour la Pêche et la Protection des Milieux Aquatiques (FJPPMA).

— Un par **pêche électrique de bordure** : pour la zone de profondeur inférieure à 1 mètre non prospectable au filet, des pêches électriques par ambiance sont réalisées par la FJPPMA, avec application du protocole dit « Échantillonnage Continu par Distance (ECD) ».



(a) Filet vertical benthique multimaille(de bordure)

(b) Filet vertical pélagique monomaille, utilisé en batteries

Figure 3.1 – Vue des types de filets utilisés

Un point essentiel est que le protocole dit des filets verticaux présente deux avantages par rapport au protocole CEN :

— C'est le protocole utilisé historiquement dans la région depuis plusieurs décennies, et mis en œuvre récemment sur les lacs de Chalain, de Bonlieu, Les Rousses, de Clairvaux, d'Ilay, du Val (39), de Saint-Point, de Remoray (25) et de Joux (Suisse) ainsi que de nombreux lacs suisses plus éloignés (T. J. Alexander et al. 2015 ; Timothy J. Alexander et al. 2015).

— Il met en rapport les captures, et donc les peuplements piscicoles, avec les habitats de l'espace lacustre, ce qui permet de mieux comprendre la structuration spatiale de ces peuplements.

— Ces deux points permettent d'évaluer les évolutions spatiales et temporelles des peuplements piscicoles, en lien avec l'évolution des habitats disponibles.

Dans les faits et par temps calme, trois bateaux interviennent conformément à la stratégie d'échantillonnage prédéfinie d'une manière coordonnée :

— Un bateau adapté et spécialement équipé pour la pose de filet en grande profondeur (filets verticaux à proprement parler).
— Deux bateaux, adaptés pour la pose de filets de fond (araignées muti-maille) et la pêche électrique embarquée, destinés à prospecter les zones littorales.

La pose des filets s'effectue en fin de journée et la relève à l'aube. À terre, une équipe rodée pour la biométrie, l'étiquetage et le conditionnement des échantillons est à pied d'œuvre dès que les premières captures sont rapatriées (voir figure 3.2).

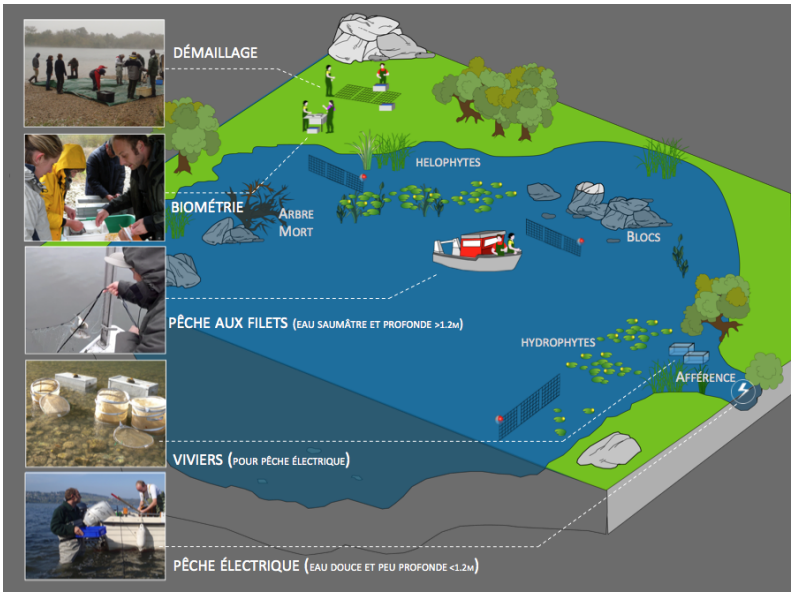


Figure 3.2 – Organisation des différents ateliers de travail des pêches lacustres

Les répartitions des actions de pêche de 2020 (poses de filets, pêches à l'électricité des habitats de bordure inventaires dans les affluents) sont visibles sur la figure 3.3. Les résultats récoltés par l'OFB et par la FJPPMA sont analysés globalement.

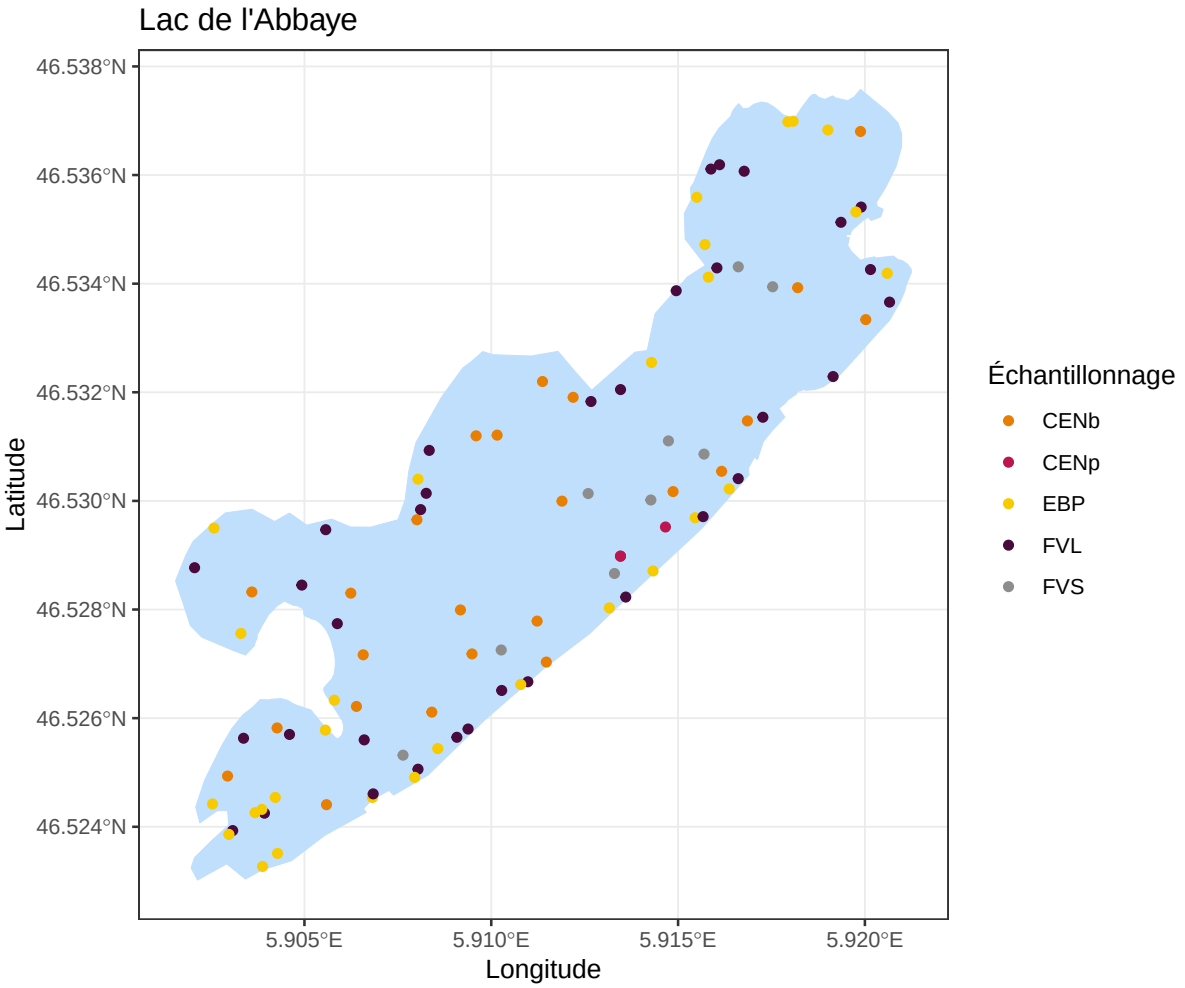


FIGURE 3.3 – Positions des échantillonnages réalisés en 2020 sur le lac de l'Abbaye

3.1.2 Évolution historique

Les différentes données disponibles concernant le lac de l'Abbaye sont issues :

- du premier échantillonnage scientifique réalisé conjointement par le CEntre national du Machinisme Agricole du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (CEMAGREF), l'Université de Franche-Comté, le laboratoire vétérinaire départemental du Jura et le Service Régional d'Aménagement des Eaux (SRAE) en 1980 (Anonyme 1982),
- des suivis réalisés par l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) en 2010 (Anonyme 2011) et en 2014 (Anonyme 2015b) dans le cadre de la DCE,
- de la campagne d'échantillonnage piscicole réalisée en 2020 dans le cadre de cette étude.

Table 3.1 – Type, nombre (n) et surface (S) de filets posés sur le lac de l'Abbaye

	1980		2010		2014		2020			
	n	S	n	S	n	S	n		S	
Type de filets					FV	FV	CEN	FV	CEN	FV
Benthique		3894	24	1080	24	1080	24	35	1080	1244
Pélagique			6	990	4	660	3	9	495	216

L'effort de pêche déployé en 2020 est important dans sa globalité, avec un effort de pêche identique à celui de 2014 pour le protocole CEN et semblable pour les filets verticaux à celui des CEN (tableau 3.1). On remarque que l'effort déployé en 1980 était nettement supérieur.

Table 3.2 – Liste, statut de protection (CSRPN,2014) des espèces piscicoles observées au cours des différentes campagnes d'échantillonnage sur le lac de l'Abbaye

Famille	Espèce	Nom latin	Code	Statut	1980	2010	2014	2020	Évolution
Centrarchidae	Perche soleil	Lepomis gibbosus	PES					✓	↗
Cyprinidae	Gardon	Rutilus rutilus	GAR	LC	✓	✓	✓	✓	↗
	Rotengle	Scardinius erythrophtalmus	ROT	LC	✓	✓	✓	✓	↘
	Tanche	Tinca tinca	TAN	LC	✓	✓	✓	✓	↘
Esocidae	Brochet	Esox lucius	BRO	VU	✓	✓	✓	✓	↘
Percidae	Perche	Perca fluviatilis	PER	LC	✓	✓	✓	✓	→
		total			5	5	5	6	

On observe dans le tableau 3.2 que 1 espèce de plus a été observée entre 2020 et 2014 avec l'apparition de la Perche soleil (PES) (*Lepomis gibbosus*). Il est à noter la capture d'écrevisses de l'espèce *Orconectes limosus* en 2020. Ces deux nouvelles espèces sont très ubiquistes et sont considérées comme des Espèces Exotiques Envahissantes (EEE) à l'échelle nationale.

Les résultats bruts sont visibles en annexes .0.1 et .0.2. Les Captures Par Unité d'Effort (CPUE) calculées à partir des captures sont visibles dans les tableaux 3.3 et 3.4. Les captures en nombre sont dominées par le Gardon (GAR), la Perche (PER) et le Rotengle (ROT). Ceci correspond à une inversion entre le ROT et le GAR par rapport aux années antérieures. La répartition en biomasse est largement dominée par le GAR, puis le ROT et la PER, ce qui correspond également à une inversion entre le ROT et le GAR par rapport aux années antérieures. La Tanche (TAN) a été échantillonnée de manière très anecdotique (2 individus).

Ces résultats sont moyens par rapport à d'autres lacs du département qui ont pu être échantillonnés avec les mêmes protocoles :
— quantités inférieures sur les lacs de Bonlieu et du Grand lac de Clairvaux,
— quantités semblables sur le lac des Rousses, du Val et d'Ilay,
— quantités supérieures sur le lac de Chalain.

Il sera intéressant d'observer dans les années futures si la PES parvient à survivre aux conditions hivernales rigoureuses du Grandvaux, l'espèce fréquentant les eaux calmes tièdes ou chaudes (Bruslé et Quignard 2013).

Table 3.3 – Répartition pour le lac de l'Abbaye par espèce et par mode de capture des CPUE (nombre d'individus par 1000 m^2 de filet ou de surface de pêche électrique)

Code taxon	CEN bent.	CEN pelag.	P. elec.	FV bent.	FV pelag.
BRO	2	-	5	-	-
GAR	310	117	7	39	181
OCL	8	-	-	7	5
PER	149	2	103	27	56
PES	-	-	4	-	-
ROT	123	135	18	90	162
TAN	-	-	1	-	-
Total	593	255	139	162	403

Table 3.4 – Répartition pour le lac de l'Abbaye par espèce et par mode de capture des CPUE (kg par 1000 m^2 de filet ou de surface de pêche électrique)

Code taxon	CEN bent.	CEN pelag.	P. elec.	FV bent.	FV pelag.
BRO	0.46	-	3.64	-	-
GAR	9.51	4.07	0.09	1.16	13.28
OCL	0.11	-	-	0.13	0.04
PER	7.96	0.01	-	0.49	0.99
PES	-	-	0.02	-	-
ROT	6.24	2.67	0.36	4.67	4.82
TAN	-	-	0.02	-	-
Total	24.28	6.75	4.13	6.45	19.13

Table 3.5 – Tailles minimales, médianes, moyennes et maximales des captures réalisées sur lac de l'Abbaye par espèce

Espèce	Min.	Med.	Moy.	Max.	Nb
BRO	220	360	384	640	12
GAR	62	152	151	346	239
OCL	54	70	77	181	16
PER	35	86	114	420	146
PES	39	60	59	82	8
ROT	55	135	151	338	193
TAN	80	98	98	115	2

La répartition des individus capturés en classes de taille est visible sur la figure 3.4. On y observe une répartition équilibrée pour les GAR et les ROT. La PER bénéficie également d'une population assez régulière dans sa répartition, mais avec néanmoins de faibles abondances pour les individus dont la taille est supérieure à 150 mm. Bien que l'effectif de Brochets (BRO) capturés soit assez faible, différentes tailles sont représentées, de 220 à 640 mm. Aucun individu de l'année ou de très grande taille n'a été capturé.

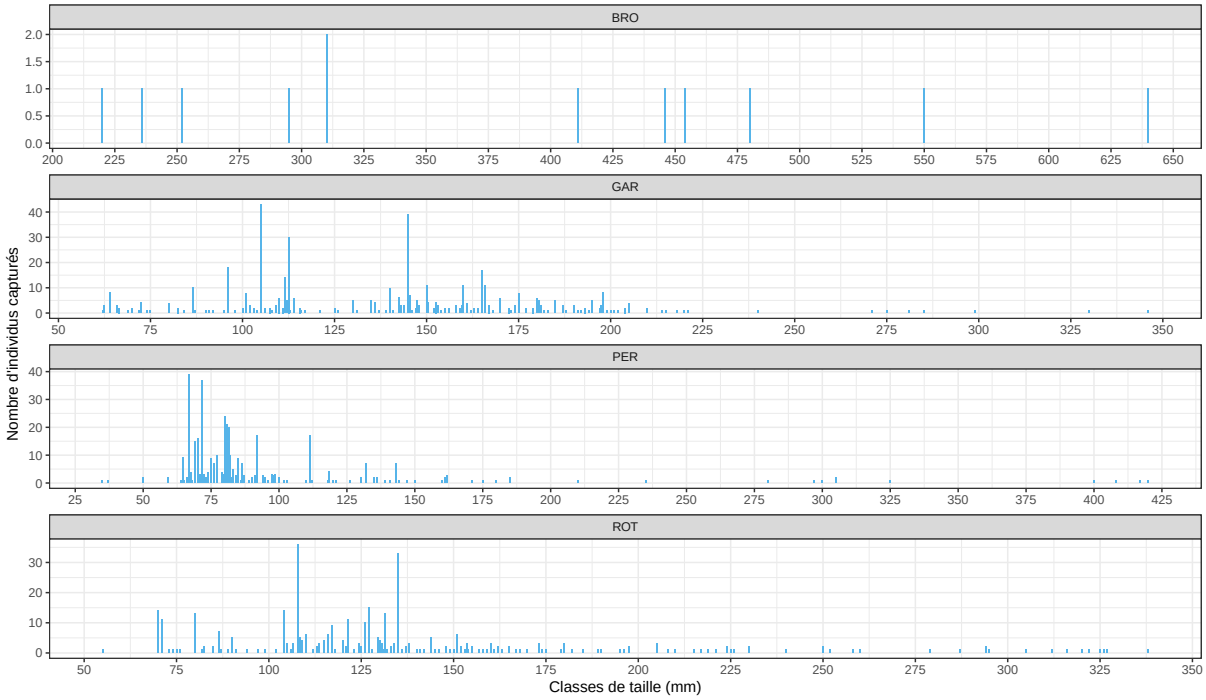


Figure 3.4 – Répartition taille/fréquence des captures sur le lac de l'Abbaye pour les principales espèces capturées (effectifs supérieurs à 10 individus)

Il apparaît ainsi que l'**ichtyofaune du lac de l'Abbaye a peu évolué dans sa structure relative** depuis 2014, tout en **restant en-deça des potentialités du lac**. Le peuplement reste dominé par des **espèces ubiquistes** que sont le GAR et le ROT, et dans une moindre mesure la PER. Les densités totales sont en baisse depuis 2010. Il faut enfin souligner l'**apparition d'une nouvelle espèce non indigène**.

3.1.3 Répartition

La répartition verticale de l'effort d'échantillonnage et des CPUE est visible sur le figure 3.5 pour le lac de l'Abbaye. On remarque une répartition régulière des captures tout au long du gradient de profondeur.

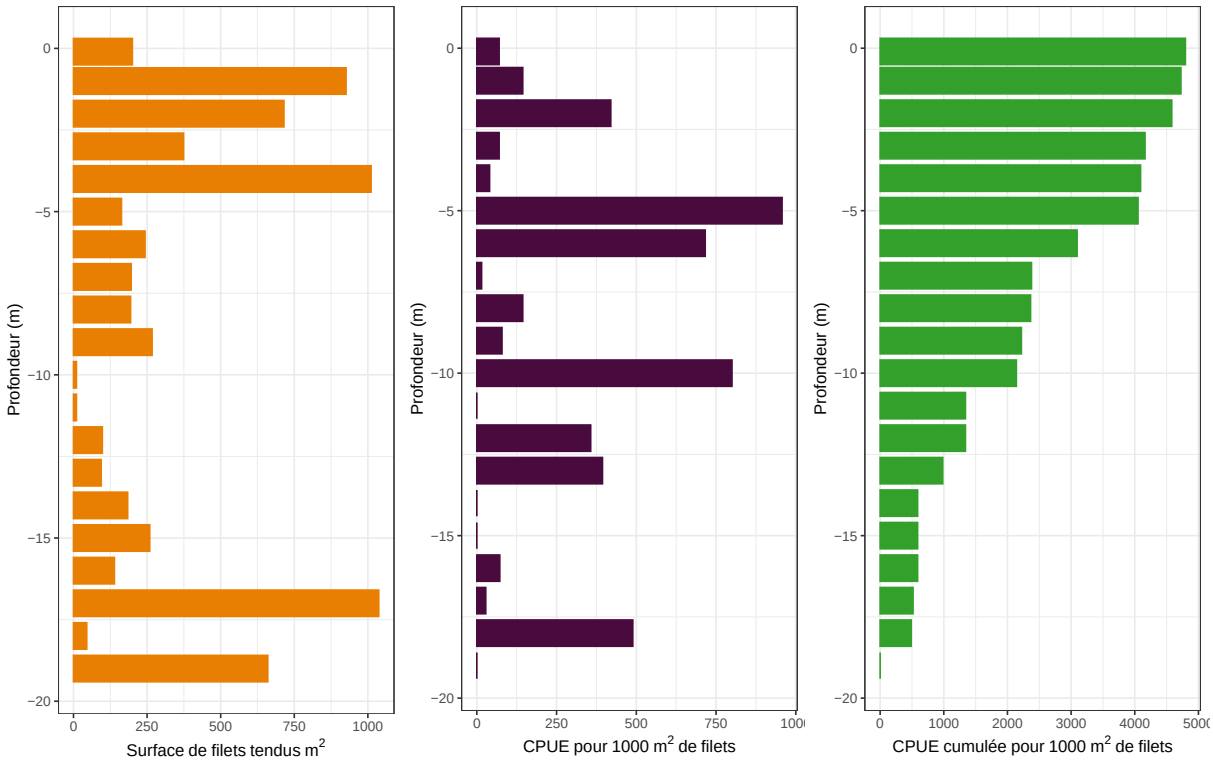


FIGURE 3.5 – Effort d'échantillonnage et CPUE en fonction de la profondeur pour le lac de l'Abbaye

L'analyse plus fine de la répartition verticale des CPUE par espèce est visible sur la figure 3.6. On peut noter que les captures de GAR dominent la moitié la plus profonde du plan d'eau, suivies par les ROT et de manière anecdotique les PER. À l'inverse, la très grande majorité des PER échantillonnées l'ont été en zone de bordure (0 à 6 mètres de profondeur).

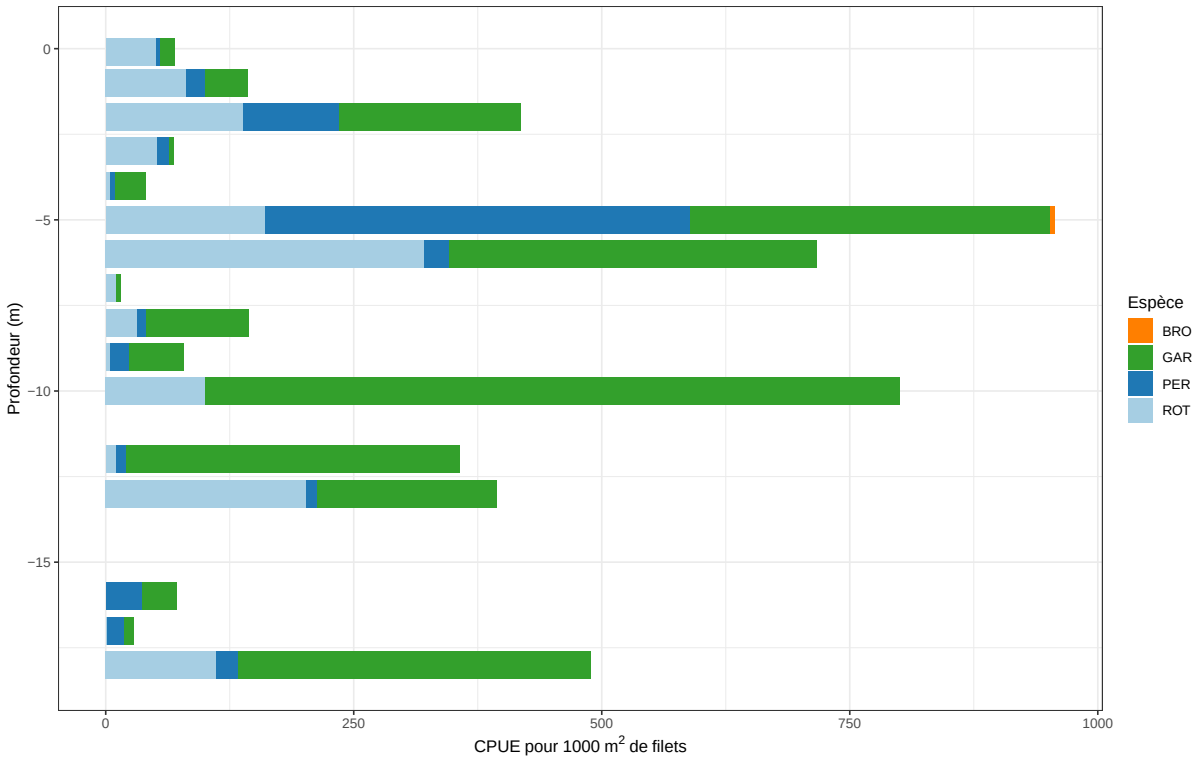


Figure 3.6 – CPUE par espèce en fonction de la profondeur pour le lac de l'Abbaye

La répartition des captures en fonction des habitats (voir figure 3.7) fait état de situations contrastées :

- les BRAnchages (BRA), les GALets (GAL) et les HÉLophytes (HEL) sont les habitats ayant engendrés des CPUE et une diversité conséquente lors de l'échantillonnage à l'électricité au niveau des zones de bordure ;
- les HYdrophytes Flottants (HYF) contribuent aux CPUE numériques lors des prospections aux filets, ainsi que de manière pondérale pour les prospections à l'électricité.

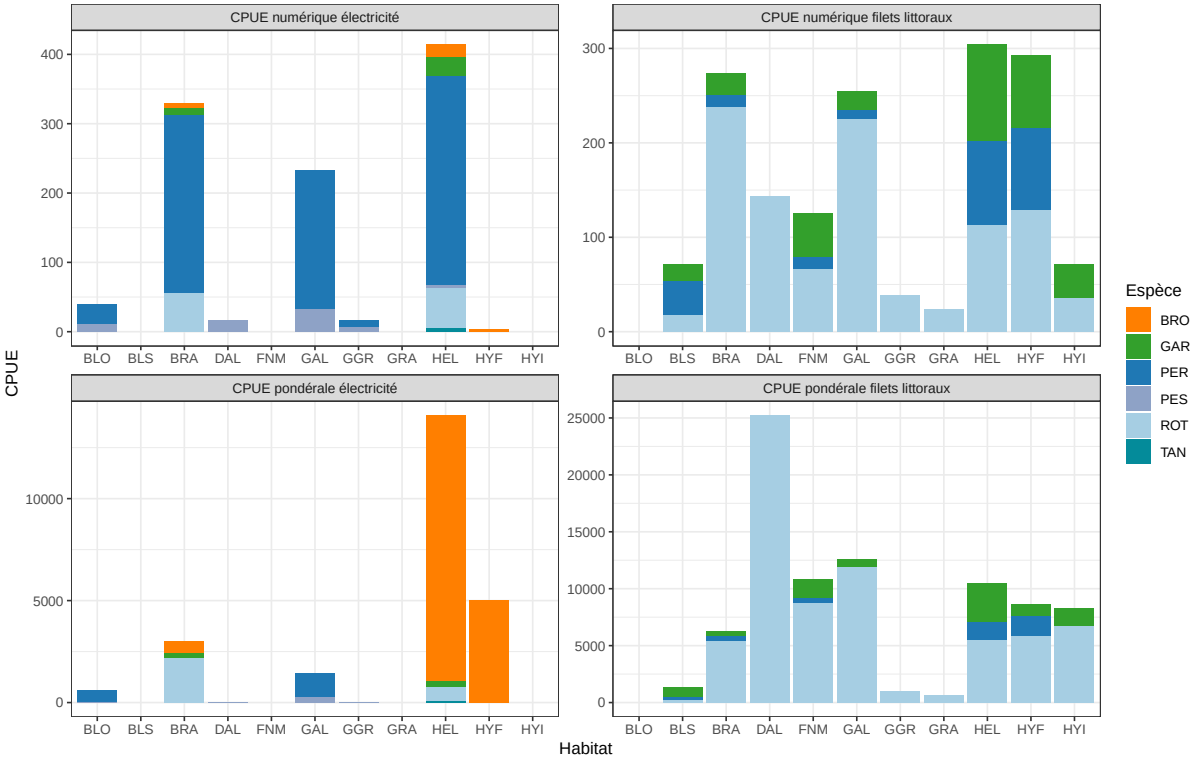


Figure 3.7 – CPUE par espèce et par mode de pêche en fonction des différents habitats littoraux pour le lac de l'Abbaye

Le **rôle particulièrement structurant des habitats disponibles** pour l'ichtyofaune est bien connu dans les lacs (Schlumberger et Élie 2008) comme dans les cours d'eau (Grandmottet 1983).

En conclusion, il apparaît que le peuplement piscicole du lac de l'Abbaye présente une **tendance défavorable dans le temps**, tant d'un point de vue **quantitatif** qu'en matière de **composition du peuplement**. Les rendements de capture sont en baisse, et la **biodiversité piscicole est altérée**. On note en effet l'apparition dans les échantillonnages de deux EEE, la PES et l'écrevisse américaine (*Orconectes limosus*). Le peuplement est dominé par les **espèces ubiquistes** que sont le GAR et le ROT.

3.2 Étude des milieux

L'état des peuplements piscicoles décrit plus haut est la conséquence de la structuration du biotope lacustre, de ses afférences et donc de son bassin versant. Cet aspect a été appréhendé au cours de ce diagnostic.

3.2.1 Cartographie de l'espace lacustre

Une reconnaissance de la surface lacustre a été menée afin de cartographier la mosaïque des pôles d'attraction piscicoles (couple substrat/support et hauteur d'eau) ainsi que la bathymétrie du lac (voir figure 3.8).

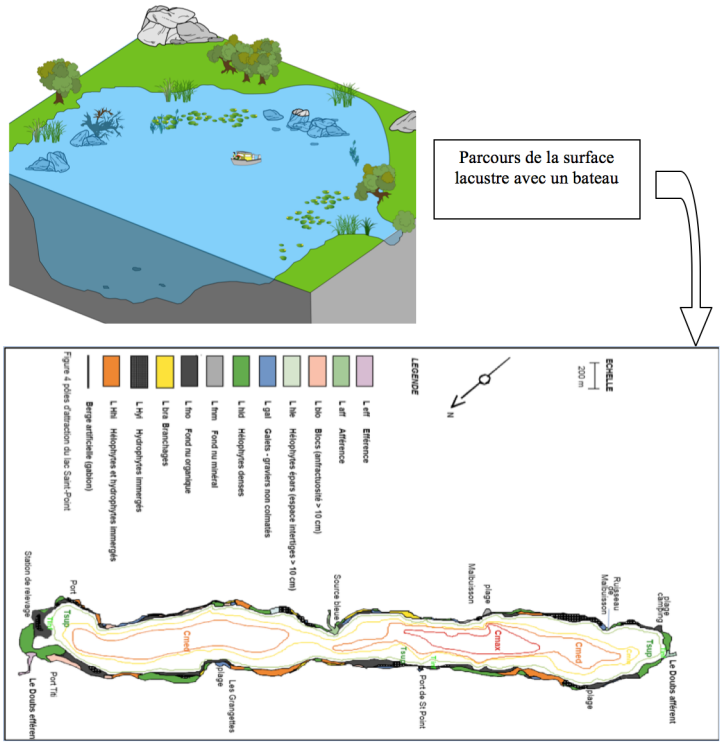


Figure 3.8 – Méthodologie concernant la bathymétrie et la cartographie des habitats

Le lac de l'Abbaye présente une cuvette dont la morphologie peut être distinguée en une zone profonde principale (voir figure 3.9), autour de laquelle on peut trouver différentes anses de profondeurs nettement moindres et variables (quelques mètres à 10 mètres). On peut observer sur l'ensemble du lac :

- une zone littorale assez développée,
- la présence d'une zone méridionale abrupte, dans la continuité de la falaise, et avec donc des habitats peu développés,
- une forte prépondérance des Fonds Nus Minéraux (FNM), suivis de zones végétalisées d'HEL, d'HYF et d'HYdrophytes Immergés (HYI),
- la composition des habitats complémentaires avec des autres substrats minéraux plus grossiers (GRAviers (GRA), GAL, BLOcs (BLO)) ainsi que de quelques BRA.

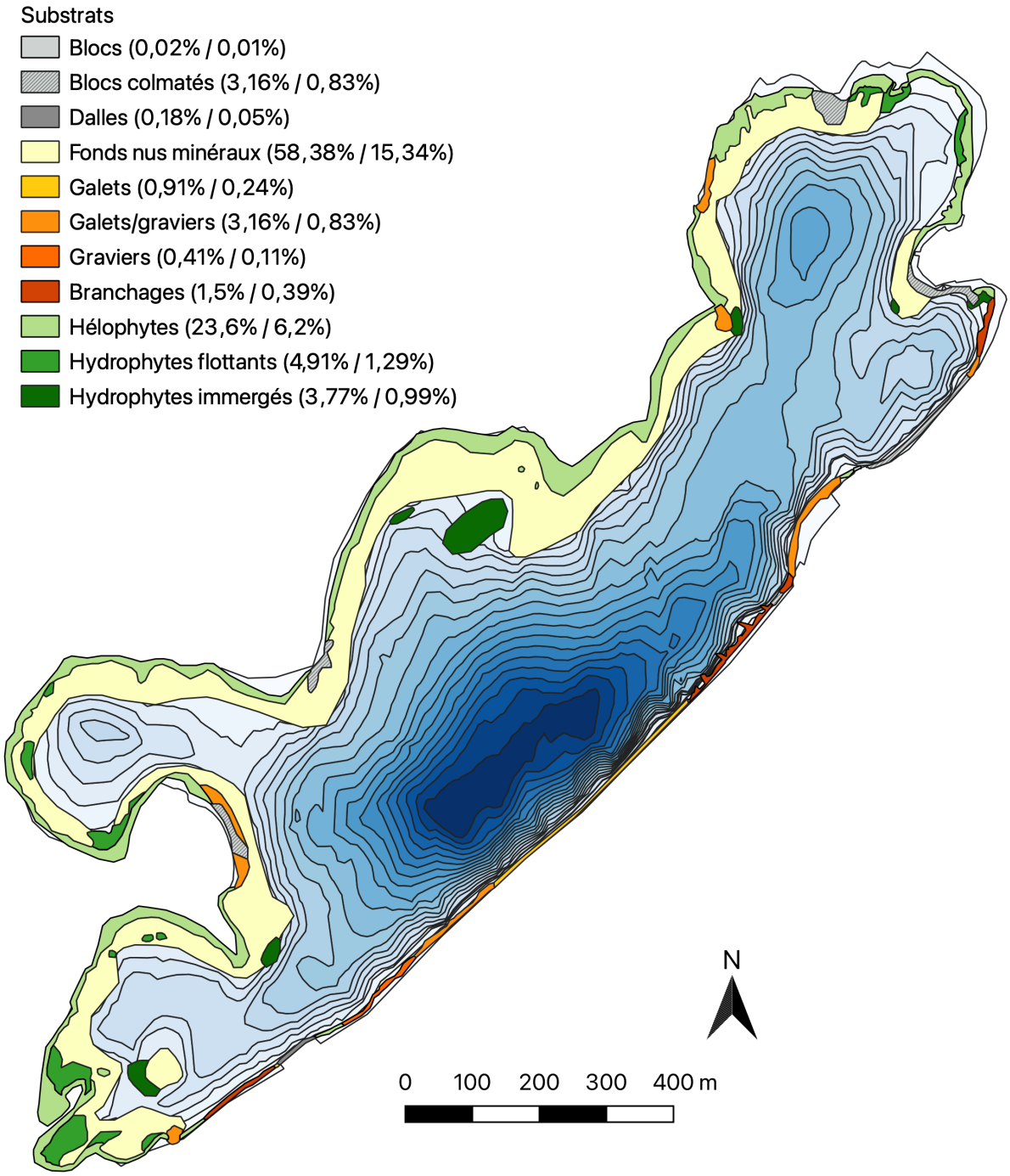


FIGURE 3.9 – Lac de l'Abbaye - Bathymétrie (isobathes de 1 mètre) et habitats répertoriés préalablement à la définition du protocole d'échantillonnage aux filets verticaux, avec leur répartitions surfaciques relatives et absolues

Par rapport à celle observée en 1904 (Magnin 1904), la flore aquatique du lac de l'Abbaye présentait en 1982 (Barbe 1982) et en 2009 (Schaefer 2009) :

- une forte régression des espèces végétales polluosensibles ;
- une régression depuis les années 1980 des plantes vasculaires (Myriophylles, Charas) dans la zone littorale relativement profonde (bas–fonds de la beine, 1,50 à 3 mètres) ;
- une présence de végétation immergée à feuilles flottantes relativement abondante, notamment dans les anses ou autres portions de la rive situées à l'abri des vents ;
- la présence de quelques stations de *Ranunculus lingua*, notamment au niveau de l'anse sud, espèce bénéficiant d'une protection nationale, et disposant de capacités d'épuration de l'eau mais également d'une sensibilité aux marnages excessifs et à la surfréquentation touristique qui constituent des menaces potentielles.

La qualité morphologique du lac de l'Abbaye **n'a pas fait l'objet d'une intense anthropisation** (curages ou rectifications par exemple) comme d'autres lacs du département (Lac de Chalain et grand lac de Clairvaux notamment). Quelques zones à fort usage sont néanmoins observables, avec quelques enrochements et passages préférentiels. Les **secteurs végétalisés à valeur patrimoniale** sont en **régression**, **limitant les habitats pour la faune associée**.

3.2.2 Variations du niveau du lac

La fonctionnalité écologique d'un habitat lacustre et de ses zones rivulaires associées est très fortement dépendante de l'évolution hydraulique du plan d'eau, c'est-à-dire des variations de son niveau (Fagot 2011). Les fluctuations de la hauteur de la ligne d'eau sont ici sous l'influence :

- de la régularité et de l'intensité des entrées d'eau, par l'hydrologie des affluents et du bassin versant (plus d'éventuelles arrivées sous-lacustres, non précisément caractérisées à ce jour) ;
- des volumes sortants, expliqués ici par :
  - l'hydrologie s'écoulant par la perte karstique, située au niveau de l'ancienne scierie,
  - les volumes prélevés pour l'AEP par le Syndicat Intercommunal des Eaux du Grandvaux (SIEG),
  - l'évaporation (3 à 5 L/s/ha en été - Schlumberger et Girard 2013), soit entre 270 L/s et 450 L/s environ.

Aucun enregistrement structuré de la cote altitudinale du plan d'eau n'était réalisé automatiquement par le passé. Un dispositif a été mis en œuvre en 2022 par le SIEG, ce qui permettra à l'avenir de documenter et d'analyser cet aspect majeur du fonctionnement lacustre, tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif.

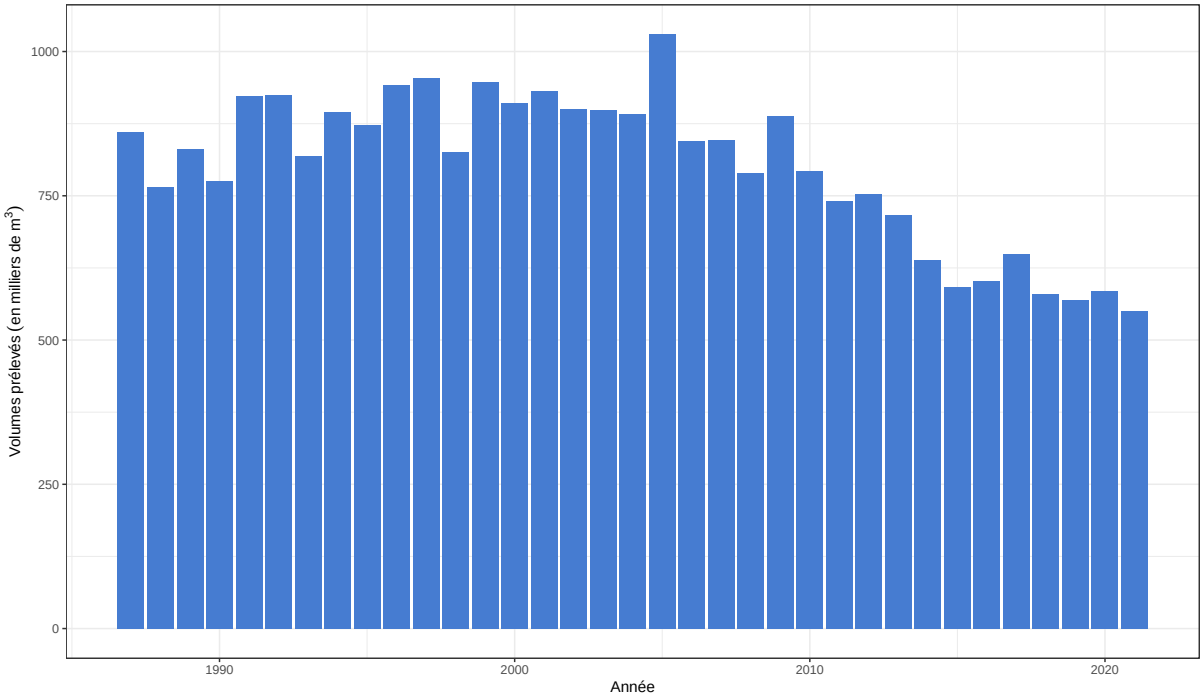


FIGURE 3.10 – Volumes annuels captés pour l'AEP (en milliers de m^3) au niveau de la prise d'eau du lac de l'Abbaye - Sources : SIERMC - SIE du Granvdvaux/SOGEDO pour années 2000 à 2004 car données SIE aberrantes

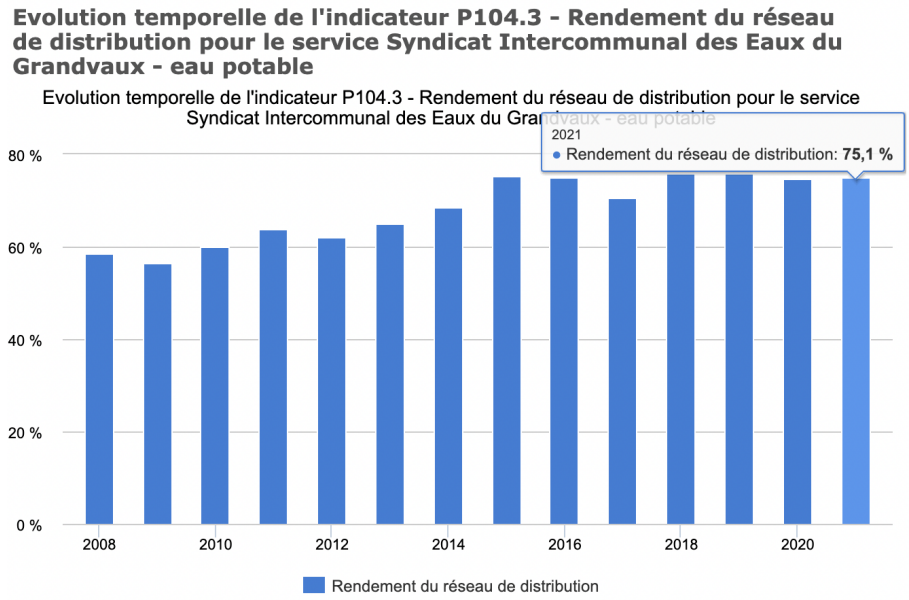


Figure 3.11 – Évolution temporelle du rendement du réseau de distribution (indicateur P104.3) en eau potable du SIE du Grandvaux - Source : http ://www.services.eaufrance.fr/

La figure 3.10 représente l'évolution inter-annuelle des volumes captés par le SIEG dans le lac de l'Abbaye. Ceux-ci varient de 550.1 en 2021 à plus de 1029.5 milliers de m^3 en 2005. **La pression exercée par l'AEP sur la ressource naturelle que constituent le lac de l'Abbaye est en importante baisse après une phase d'augmentation**. Il serait toutefois nécessaire d'affiner cette analyse interannuelle par l'évaluation de la répartition des prélèvements au cours de l'année, sachant qu'une part importante des pompages est potentiellement réalisée en période estivale et/ou hivernale afin de suppléer l'augmentation de la demande. Le **rendement du réseau** du Système d'Information sur l'Eau (SIE) est par ailleurs stable sur les 7 dernières années (voir figure 3.11), après une augmentation continue entre 2009 et 2015. Le rendement de 75,1 % obtenu en 2021 **reste toutefois en-deça de l'objectif minimum de rendement de 85 %** fixé par la Loi Grenelle 2 à travers le décret n°2012-97 du 27 janvier 2012.

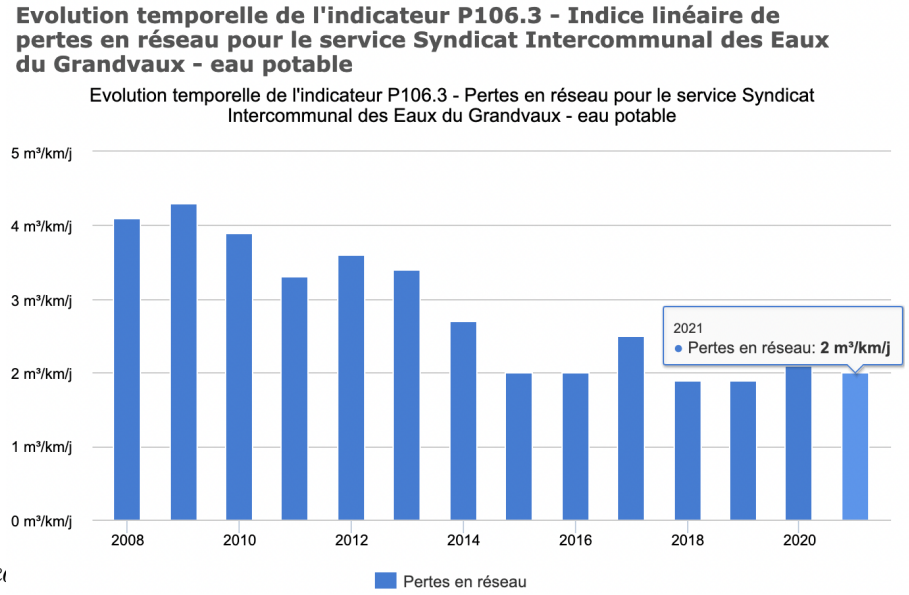


Figure 3.12 – Évolution temporelle de l'indice linéaire de pertes en réseau (indicateur P106.3) du réseau de distribution en eau potable du SIE du Grandvaux - Source : http ://www.services.e

On peut toutefois également signaler une évolution favorable de l'indice linéaire de perte en réseau (voir figure 3.12), avec une division par deux de sa valeur entre 2009 et 2015, pour une population desservie très stable depuis 2008 (environ 10000 habitants).

En conclusion de cette analyse du fonctionnement hydrologique du lac de l'Abbaye, il apparaît que :

— la disponibilité futures des **hauteurs d'eau** permettra d'en étudier les **variations**, en lien avec les conditions hydroclimatiques naturelles qui vont évoluer du fait du changement climatique, mais également de la gestion humaine qui peut être réalisée (gestion du vannage à l'exutoire, prélèvements pour l'AEP, etc.) ;

— les **pompages** réalisés au titre de l'AEP dans le lac de l'Abbaye sont **en baisse** sur la période récente, mais avec un **rendement du réseau proche de 75 %**.

3.2.3 Physico-chimie des eaux

Méthodes d'investigation

La qualité de l'eau des lacs a fait l'objet d'un suivi régulier au titre de la DCE : Péricat et Coppin 2011 ; Bourgeot, Olivetto et Prompt 2014 ; Bourgeot, Olivetto et Prompt 2017 ; Bourgeot, Olivetto et Prompt 2020.

Ainsi, seul un suivi physico-chimique simple a été réalisé sur ces lacs, avec, au niveau du point de plus grande profondeur et à la fin de la période de stratification estivale, l'évaluation de la transparence au disque de Secchi, accompagnée de mesures in-situ tous les mètres des paramètres suivants :

- température,
- conductivité,
- O2 dissous (concentration et saturation),
- pH.

Résultats

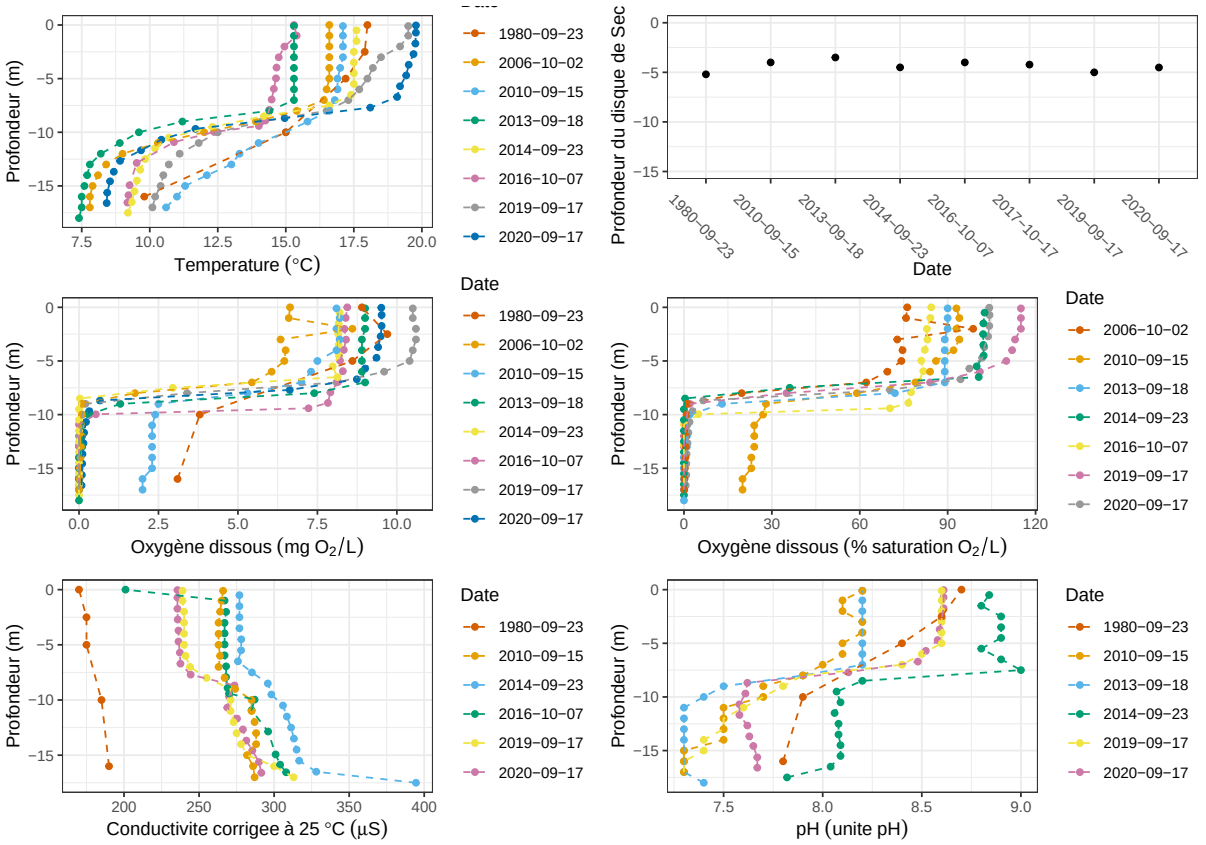


Figure 3.13 – Profils verticaux réalisés dans le lac de l'Abbaye au point de plus grande profondeur en fin de période de stratification estivale

La synthèse des profils de mesures physico-chimiques réalisées lors des différentes campagnes de suivi du lac de l'Abbaye en fin de période de stratification estivale (figures 3.13) permet de tirer quelques observations (données historiques issues de Anonyme 1982 ; Barbe et al. 2007 ; Péricat et Coppin 2011 ; Bourgeot, Olivetto et Prompt 2014 ; Bourgeot, Olivetto et Prompt 2017 ; Bourgeot, Olivetto et Prompt 2020 ; Mettetal et al. 1994 ; Fagot 2017b ; Fagot 2017a ; Essert 2017 - Données de Bouvet 2013 non représentées ici) :

— On ne peut pas conclure à une évolution de la profondeur d'extinction du disque de Secchi.

— Le spectre des **conductivités** observées (fourchette entre valeurs minimales et maximales) présente des valeurs en **nette augmentation** entre les campagnes de 1980, et celles des années 2010 (100 µS/cm). La même tendance à l'augmentation a été observée sur de nombreux lacs du massif jurassien (Fagot 2013 ; Geffroy 2015 ; Fagot 2016 ; Essert 2017 ; Fagot 2018 ; Fagot 2019 ; Fagot 2020).

— Les **faibles valeurs d'oxygénation estivale en profondeur** observées au cours de ces suivis sur les 11.5 derniers mètres sont récurentes sur l'ensemble des chroniques, soit environ **60 % de la profondeur totale**.

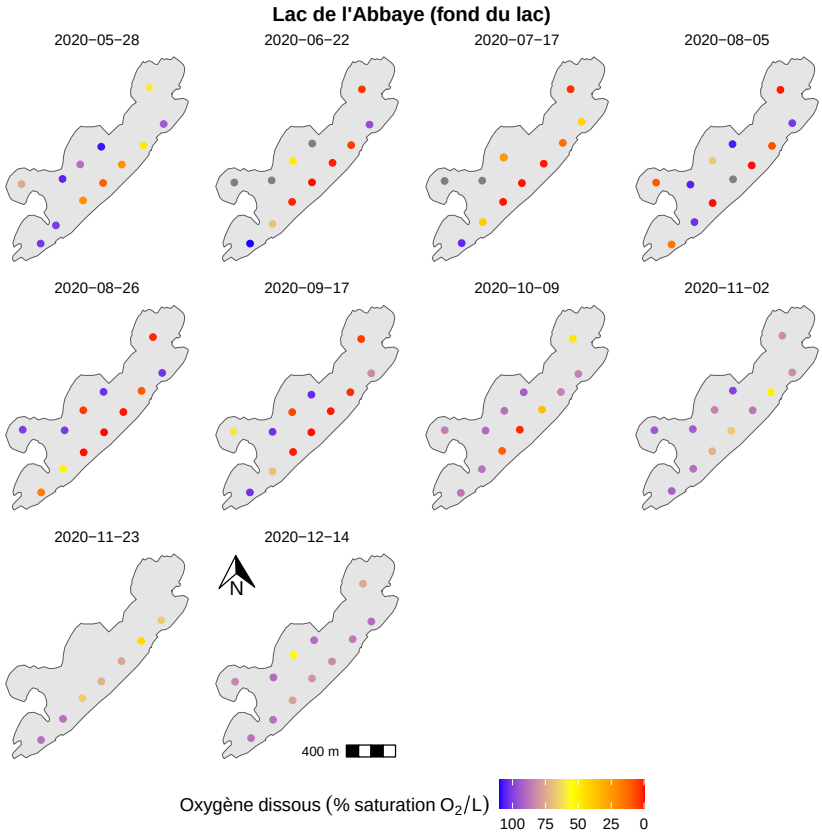


Figure 3.14 – Saturation en oxygène dissous (%) au niveau du plancher en 12 points du lac de l'Abbaye

L'année 2020 a également fait l'objet de 10 campagnes de suivi répartis en 12 points à la surface du lac. Les paramètres étaient identiques à ceux suivis en fin de période de stratification estivale. On peut observer sur la figure 3.14 que la **désoxygénation** présente au cours de l'épisode de stratification estivale affecte une **étendue spatiale non négligeable**, qui s'étend au-delà de la fosse du point de plus grande profondeur. Il est à noter la particularité que constitue le point situé dans l'anse la plus au nord, très souvent en décalage négatif avec les autres zones de faible profondeur. Cette observation est également valable concernant la conductivité, qui y est généralement également plus élevée.

Une colonne de capteurs de mesures de la température et de l'oxygénation de l'eau à différentes profondeurs a également été installé au cours de l'année 2020, avec un fonctionnement continu au cours du temps. On peut remarquer grâce à ce suivi que la **température de fond du lac** est relativement **élevée** en comparaison à d'autres plans d'eau naturels du département, avec une valeur médiane au cours de l'année proche des 10°C. L'année 2022 présente une valeur légèrement supérieure à celle de l'année 2021.

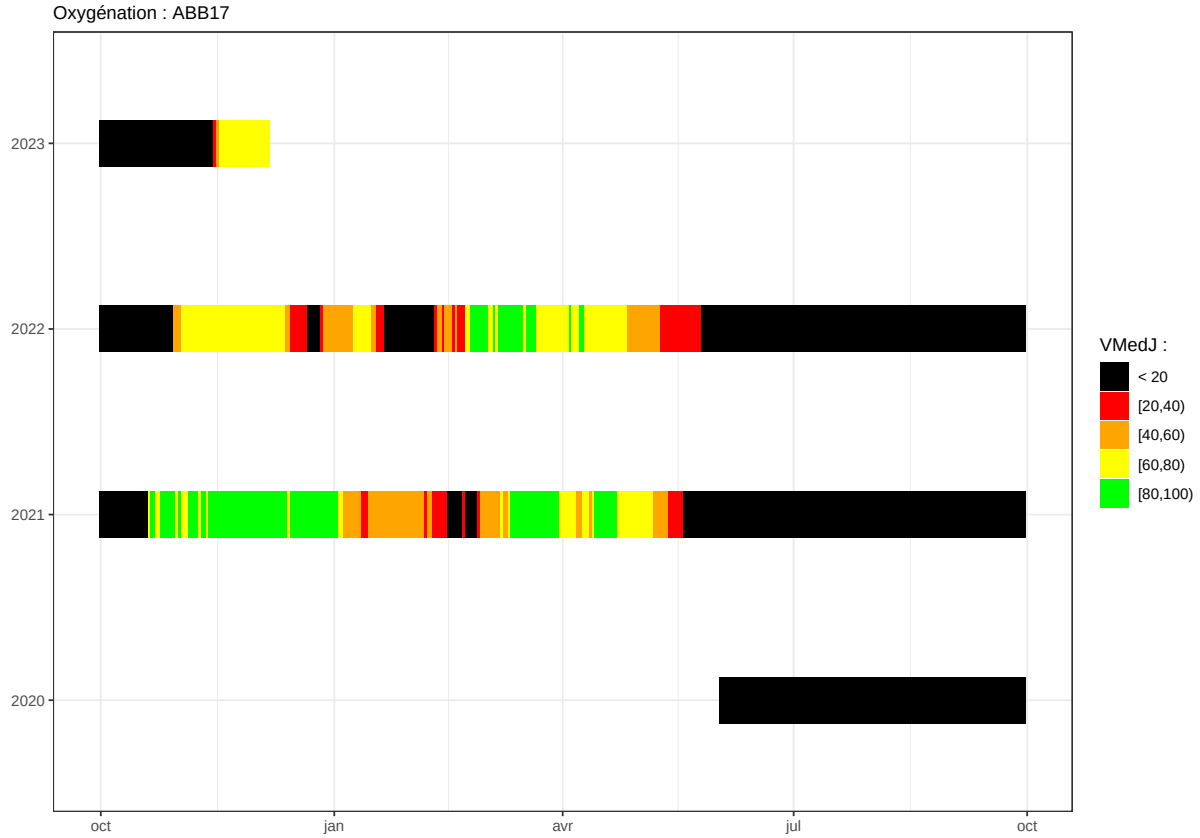


Figure 3.15 – Évolution temporelle des classes de saturation en oxygène dissous (%) au point de plus grande profondeur du lac de l'Abbaye

La figure 3.15 permet de visualiser les classes de saturation en oxygène au point de plus grande profondeur du lac. On peut citer comme principales observations :

— une anoxie qui début tôt dans la saison estivale (mi-mai à fin mai), pour s'étendre jusqu'à fin octobre voire mi-novembre, soit **presque la moitié de l'année**.
— l'existence d'une **anoxie au cours de la période de stratification hivernale**, ce qui est particulièrement remarquable, avec 11 jours durant l'hiver 2020-2021 et 19 jours l'hiver 2021-2022.

L'analyse de la bibliographie et des données disponibles nous indique par ailleurs que :

— la demande en oxygène observée s'explique par des processus biologiques, notamment afin de dégrader la **matière organique** accumulée dans les **sédiments**. Celle-ci constitue une **très forte part** (40 %) des sédiments (Bourgeot, Olivetto et Prompt 2020) ;
— les quatre campagnes de 2019 de chimie des eaux de fond et dans la zone intégrée montrent la présence d'**ammonium**, dans des concentrations comprises entre 0,02 et 0,24 mg(NH_4^+)/L ;
— les teneurs en nutriments dans les sédiments (azote Kjeldahl, phosphore total) ou l'eau intersticielle (ammonium et phoshore) sont importantes ;
— la recherche de micropolluants dans l'eau montre la présence, toujours en 2019, de **caféine** et de metformine (**antidiabétique**), traceurs de **rejets domestiques**. Cette même recherche fait également état de biocides (mono- et dibutylétain cations, isodrine - sous-produit de dégradation d'insecticides organo-chlorés dont l'utilisation est interdite en France depuis 1994) ainsi que de **cyanure**, 4-tert-butylphénol et diméthylphénol-2,4 ;
— les sédiments présentent pour leur part des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) ainsi qu'une forme de crésol, substance notamment utilisée dans la fabrication d'**herbicides**, ainsi que des PolyChloroBiphényles (PCB) (Bourgeot, Olivetto et Prompt 2020) ;
— les sédiments contiennent, lors des campagnes de 2010, 2013 et 2019, des concentrations en arsenic de respectivement 23.1, 27.7 et 19.8 mg(As)/kg. Ces concentrations sont susceptibles d'engendrer des effets de manière occasionnelles à fréquentes sur les organismes vivants (Environnement Canada 2007). Il est observé le même phénomène concernant le plomb.

Il est enfin possible de citer le travail d'analyse paléolimnologique réalisé par l'Université de Franche-Comté (comm. pers. Laurent Millet). Ce travail de prélèvement et d'analyse de différentes carottes sédimentaires permet de reconstituer une partie de l'histoire du plan d'eau, afin de décrire les évolutions au cours du temps de certaines de ses caractéristiques physico-chimiques. Il a été mis en évidence concernant le lac de l'Abbaye :

— une **augmentation** du taux de **carbone organique** contenu dans les sédiments entre 1900 et 1960, avec ensuite une légère baisse ;
— une **baisse du rapport C/N** et une **augmentation du flux de pigments chlorophylliens** au moment de ce pic, traduisant une origine aquatique de cette production, soit un phénomène dit d'« eutrophisation » ;
— la **période 1950-1960** correspond à des **changements majeurs dans les com-**

munautés phytoplanctoniques : baisse des chlorophycées, augmentation des diatomées et cyanobactéries ;

— le début de la période d'accumulation de la matière organique aquatique correspond à une **augmentation des spores de champignons coprophiles**, traduisant l'influence du pastoralisme « traditionnel » sur l'augmentation des nutriments ;

— des changements de pratiques et/ou d'autres sources de nutriments (ex : assainissement) à partir des années 1940 ;

— une **amélioration relative à partir des années 1970**, avec un retour à un état (taux d'accumulation de matière organique) proche de la référence ancienne tout en restant supérieur ;

— une **tendance récente** (depuis 2000) à une **augmentation du carbone organique**, des **pigments** et des **chlorophycées.**

La qualité physico-chimique du lacs de l'Abbaye présentent différents constats :

— Une **désoxygénation estivale massive** du plan d'eau sur plus de la moitié de sa profondeur maximale durant certaines périodes.

— Une **anoxie hivernale** existante dans la zone profonde.

— La **présence de pollutions** d'origine domestique *a minima* est **avérée**. On observe notamment la présence de caféine et de molécules médicamenteuses.

— On remarque également la **présence de molécules toxiques** organiques ou minérales telles que des HAP, des produits phytosanitaires et des Éléments Traces Métalliques (ETM).

— Le **taux de matière organique** présente dans les sédiments de la zone profonde est **le plus important** de l'ensemble des lacs naturels du massif du **Jura**.

---

4 États des lieux

Les constats réalisés précédemment sont à mettre en relation. Le bassin d'alimentation du lac de l'Abbaye n'est pas parfaitement identifié à ce jour du fait de son caractère karstique, malgré son utilisation pour l'AEP. Les arrivées hydrologiques sont principalement assurées par quelques très petits affluents et le ruissellement. Une variabilité entre hautes et basses eaux est vraisemblable (Mettetal et al. 1994). Son petit bassin versant topographique (estimé à environ 3,25 km^2) est principalement occupé par des prairies (> 50 % - données Corine Land Cover (CLC)), ainsi que de manière beaucoup plus anecdotique par quelques zones de tourbière, de tissu urbain discontinu et de forêt de conifères. L'intérêt écologique de la zone est également reconnu par l'inscription du secteur au sein du Site d'Intérêt Communautaire (SIC) « FR4301313 - Grandvaux » de la Directive Habitats-Faune-Flore (DHFF). L'**enjeu de préservation de la qualité des eaux du lac** est majoré par le fait :

- qu'il alimente par des écoulements souterrains un très important linéaire, qui constitue le site souterrain dit de l'Enragé, par ailleurs reconnu comme Ressource Karstique Majeure (RKM) (Anonyme 2013), donc étant à fort enjeu pour le futur,
- que ce réseau karstique débouche lui-même dans la Bienne, cours d'eau lui-même en difficulté depuis de nombreuses années (Agnelot et Bourlier 2017).

La tourbière présente en rive droite du lac de l'Abbaye devrait avoir un rôle de régulation important, de la qualité et de la quantité d'eau, mais également d'habitat naturel remarquable. La présence de drains, et l'enfrichement et le développement des ligneux témoignent d'une **altération** de ses **capacités hydrologiques**. De plus, la gestion du marnage du plan d'eau observée au cours de l'été 2022, qui a été important en intensité (environ 2 mètres, comm. pers. Fabienne Lacroix et Yannick Schweitzer), qui n'était pas la règle, laisse craindre une évolution négative si elle venait à se maintenir.

L'observation des suivis de la qualité de l'eau et des sédiments réalisés au titre de la DCE fait état d'**arrivées d'eaux ne faisant pas l'objet d'un assainissement efficace**, ainsi que de la **présence de molécules toxiques** telles que des HAP, dont certains en fortes concentrations, des produits phytosanitaires et des ETM. L'observation de non conformités au niveau des eaux brutes du captage AEP du fait de la présence d'ammonium est également un témoin de problématiques de qualité d'eau (exemple de 0 ;13 mg/L le 2022-11-14, comm. pers. Yannick Schweitzer).

Les sédiments de fond contiennent de **très importantes quantités de matière organique** (comm. pers. Laurent Millet). Ceci entraîne une dégradation des conditions des zones profondes, caractérisée notamment par l'**importante désoxygénation du plan d'eau**. Il est ainsi possible d'estimer, à partir des données bathymétriques, qu'en fin de période de stratification estivale :

— environ 59.8 % du volume du lac est désoxygéné (profondeur comprise entre 8 mètres et le fond), pour l'ensemble de la surface du plan d'eau ;
— environ 35.6 % du volume du lac est désoxygéné (profondeur comprise entre 11 mètres et le fond), pour l'ensemble de la surface du plan d'eau ;
— environ 40.5 % du volume du lac est désoxygéné (profondeur comprise entre 8 mètres et le fond), en se restreignant à la surface de la principale zone profonde.

Cet état génère une **forte vulnérabilité face au changement climatique**, et notamment face à ses caractéristiques de réchauffement. On peut ainsi citer comme potentiels phénomènes à venir (liste non exhaustive) :

— un allongement de la période de stratification estivale,
— une anoxie plus longue,
— des phénomènes de relargages de nutriments accentués,
— un changement des communautés phytoplanctoniques (cyanobactéries, etc.).

Des recherches (Belle, Parent et al. 2014 ; Belle, Valérie Verneaux et al. 2016) ont montré sur le lac de Narlay une intrication dans le déclenchement de profondes modifications trophiques (activation d'une voie d'utilisation du méthane) suite aux évolutions climatiques naturelles et à l'évolution des modes d'utilisation du territoire par l'activité humaine. D'autres travaux menés dans la continuité (Essert 2018 ; Essert, Masclaux, Valérie Verneaux et Millet 2022 ; Essert, Masclaux, Valérie Verneaux, Lyautey et al. 2022) ont montré sur différents lacs du massif jurassien un lien fort entre ces perturbations métaboliques lacustres (sédimentation, oxygénation, etc.) et le fonctionnement du cycle du carbone des réseaux trophiques pélagiques lacustres. Ainsi, parmi les lacs suivis dans le département du Jura, le lac de l'Abbaye est le **deuxième concernant sa concentration en méthane** (CH_4) dissous dans la colonne d'eau au cours de la stratification estivale. Un lien est également établi entre les concentrations en méthane (CH_4) et dioxyde de carbone (CO_2) dissous stockés dans l'hypolimnion durant la stratification estivale et la surface relative utilisée par l'agriculture sur le bassin versant. Ces constats mettent en évidence la **forte responsabilité de maîtrise des impacts** des activités actuelles sur le bassin versant, amplifiée par le contexte de changement climatique actuel.

Le **peuplement piscicole** du lac de l'Abbaye présente une **situation défavorable** dans le temps, avec des limitations quantitatives mais également en matière de composition. La dominance d'espèces piscicoles ubiquistes est une conséquence de la trajectoire évolutive du plan d'eau.

5 Propositions d'action

L'ensemble de ces constats doit mener à des **actions visant à améliorer le fonctionnement de ces milieux naturels**.

5.1 Usages sur le bassin versant

— Des **arrivées d'eaux usées non traitées** ont un impact négatif sur la qualité des eaux des lacs. L'identification de leur origine et l'aménagement des réseaux et/ou des systèmes d'assainissement défaillants ou éventuellement absents doivent faire l'objet d'actions ambitieuses et rapides, afin de réduire le plus possible le nombre de rejets non traités.

— Les éventuels **ruissellements directs** pouvant parvenir au lac doivent être limités au maximum, et passer par des zones tampon afin de limiter les apports en substances toxiques, mais également en Matières En Suspension (MES) pouvant contenir des matières organiques dont les sédiments du lac sont déjà saturés.

— La mise en œuvre de **traitements phytosanitaires** doit être proscrite sur l'ensemble du bassin versant, la présence de molécules de ce type dans l'eau et les sédiments du lac prouvant le potentiel transfert sur le territoire, probablement via les drains et les affluents

— Le maintien ou le renforcement des **dispositions qui limitent la fréquentation touristique** (plages clairement délimitées, interdiction des sports nautiques, etc.) doit être envisagé, afin de réduire la pression sur les habitats aquatiques, notamment végétaux.

5.2 Gestion

Il paraît indispensable que la **gestion du marnage** soit douce et compatible aux enjeux actuels du lac de l'Abbaye, tant concernant l'amplitude totale des variations, que de leur saisonnalité et leurs modalités fines (vitesses, etc.).

5.3 Aménagement

Les principales mesures doivent permettre la réapparition d'habitats attractifs, diversifiés et épurateurs. Une **restauration morphologique de la tourbière**, afin notamment d'en réduire le degré d'enfrichement, puis la rehausse de la ligne d'eau par colmatage des drains, permettrait de **reconstituer les habitats** de ce milieu, en favorisant la recréation d'une hétérogénéité et d'une attractivité favorables aux espèces (macroinvertébrés, végétaux, etc.) ;

5.4 Suivi

- Le suivi et l'entretien du **dispositif** de mesure de la **cote du plan d'eau** installé en 2022 par le SIEG permettra d'établir une chronique fiable de la hauteur du lac (altitude Nivellement Général de la France (NGF)). La même démarche est actuellement en cours d'établissement sur différents lacs naturels du massif jurassien (lacs de Bonlieu, de Clairvaux, de Chambly, d'Ilay, du Val, de Chalain et des Rousses a minima).
- La poursuite d'un **suivi physico-chimique** du lac, a minima de la température et de l'oxygène dissous au point de plus grande profondeur, permettra d'avoir une chronique de l'évolution de la désoxygénation de la zone profonde. Ce suivi est actuellement mené par la FJPPMA pour le SIEG. Une réflexion serait à mener afin de pouvoir suivre éventuellement d'autres paramètres, idéalement de manière continue.
- La mise en place d'un **suivi** météorologique, et notamment **pluviométrique**, serait très intéressant. Ceci permettrait d'apprécier plus finement les variations du niveau du lac. Des données locales sont importantes car d'importantes disparités avec Saint-Laurent-en-Grandvaux sont signalées (Mettetal et al. 1994).
- La réalisation d'un suivi ciblé au sujet des **espèces patrimoniales prioritaires** : *Nuphar pumila* et *Nuphar x spenneriana*, *Cicuta virosa*, en deuxième lieu *Ranunculus lingua*, *Potamogeton gramineus* et *Potamogeton x zizii* (Schaefer 2009).

5.5 Connaissance

- Les données **physico-chimiques** et **macrobenthiques** concernant les **affluents** du lac seraient à renouveler (Anonyme 1982 ; Mettetal et al. 1994), afin de s'assurer de l'absence d'apports polluants.
- La connaissance fondamentale du **fonctionnement hydrologique** et **hydrogéologique** du lac de l'Abbaye reste à perfectionner.
- La réalisation d'un Indice Biotique Lacustre (IBL) dans le lac de l'Abbaye permettrait d'établir un **état des lieux de la faune benthique** de celui-ci, qu'il serait possible de comparer aux données historiques disponibles.
- La vérification de l'**état de dépollution de l'ancienne scierie** et des éventuelles sources potentielles de toxiques sur le pourtour du lac est nécessaire, afin de stopper les apports encore existant.

5.6 Synthèse

Le tableau 5.1 établi une synthèse des actions à entreprendre et détaillées dans les sections précédentes.

Table 5.1 – Synthèse des actions à entreprendre

Type	Thématique	Objectif	Action
Usages	Assainissement	Stopper les arrivées d'eaux usées non traitées	- Identification des origines - Aménagement des réseaux - Contrôles des ANC
		Stopper les ruissellements directs	
	Usages agricoles/domestiques de pesticides	Connaître et améliorer si nécessaire les pratiques	- Proscrire l'utilisation
	Tourisme	Organisation de la fréquentation	- Limitations sur des points clés
Gestion	Habitats	Marnage	- Gestion en adéquation avec les besoins du milieu et des espèces
Aménagements	Habitats	Restauration morphologique des zones humides	- Oblitération des fossés de drainage
Suivi	Eau des lacs	Hauteurs d'eau	- Poursuite du suivi piézométrique
		Physico-chimie	- Poursuite du suivi de la colonne à la profondeur maximale
	Météorologie	Pluviométrie	- Mise en place d'un suivi
	Botanique	Espèces patrimoniales prioritaires	- Suivi à réaliser
Connaissance	Eau des affluents	Nutriments/MI	- Suivi à réaliser
	Eau du lac	Hydrogéologie	- Connaissance à améliorer
	Eau du lac	Biologie	- IBL
Connaissance	Bassin versant	Toxiques	- Origine des pollutions observées

6 Conclusion

Le lac de l'Abbaye offre un cadre naturel et paysager splendide au sein du Grandvaux. Il constitue également la tête de bassin d'un important hydrosystème souterrain karstique, dont l'exurgence a lieu au niveau de la source de l'Enragé, dans la vallée de la Bienne.

Des activités humaines engendrent la présence d'une très importante quantité de matières organiques dans les sédiments du lac, épuisant l'oxygène dissous présent dans la colonne d'eau. Par ailleurs, l'apport d'eaux non épurées entraînent la présence de molécules indésirables dans des hydrosystèmes naturels, dont les sources ne sont pas clairement identifiées.

D'anciens travaux d'exploitation de la tourbe et de drainage de la tourbière située en rive nord ont eu pour effet de réduire fortement les habitats naturels de nombreuses espèces vivantes du fait d'une déstructuration et/ou d'un caractère moins humide. Les capacités de stockage en eau et d'autoépuration ont également été altérées.

La gestion du niveau du plan d'eau constitue également un enjeu majeur de la préservation de la qualité de l'eau et des habitats. Celle-ci s'organise autour de la gestion de la vanne située à l'exutoire du lac, et également en lien avec les prélèvements pouvant être réalisés au titre de l'alimentation en eau potable.

Le peuplement piscicole observé présente une situation défavorable dans le temps, avec des limitations quantitatives mais également en matière de composition. La dominance d'espèces piscicoles ubiquistes est une conséquence de la trajectoire évolutive du plan d'eau.

Afin de maintenir et/ou de restaurer le fonctionnement écologique de cet ensemble de milieux naturels (lac, zones humides, cours d'eau), il apparaît indispensable d'engager un ambitieux programme de travaux de reconquête. Cette démarche doit passer par un éventail d'opérations complémentaires telles que la restauration physique des hydrosystèmes associés, l'évolution de certaines pratiques sur le territoire et/ou d'aménagements de l'espace, et la recherche de nouvelles clés de compréhension des fonctionnements écologiques actuels.

Ces actions opérationnelles doivent être accompagnées par la mise en œuvre et/ou par la poursuite de mesures d'acquisition de connaissance, de suivi et de gestion, afin de pouvoir en contrôler l'efficacité et les éventuelles limitations.C'est seulement à travers ces opérations complémentaires et nécessairement concertées que l'environnement du lac de l'Abbaye avancera vers une amélioration écologique, donc paysagère, culturelle et sociale.

7 Bibliographie

Aeschbacher, Agnès et al. (1983). « Poissons Des Lacs : Écologie. Essai de Cartographie Piscicole Appliquée Aux Lacs Du Jura : L'Abbaye, Clairvaux, Les Rousses, Saint-Point ». Mémoire de DESS "Eaux Continentales". Besançon : Université de Franche-Comté.

AFNOR (2005). *NF EN 14757 T90-366 : Qualité de l'eau – Échantillonnage Des Poissons à l'aide de Filets Maillants*.

Agnelot, Kévin et Alexis Bourlier (oct. 2017). « Recherche Des Causes, Antérieures et Actuelles, Entraînant l'altération de La Capacité Biogénique de La Bienne (39) ». Mémoire de Master 2 Qualité Des Eaux, Des Sols et Traitements. Besançon : Université de Franche-Comté.

Alexander, T. J. et al. (2015). « Estimating Whole-Lake Fish Catch per Unit Effort ». In : *Fisheries Research* 172, p. 287-302.

Alexander, Timothy J. et al. (jan. 2015). « Evaluating Gillnetting Protocols to Characterize Lacustrine Fish Communities ». In : *Fisheries Research* 161, p. 320-329. issn : 0165-7836. doi : 10.1016/j.fishres.2014.08.009.

Anonyme (juin 1982). *Le Lac de l'Abbaye (Massif Du Jura) - Étude Écologique et Biologique - Diagnose*. Rapp. tech. Besançon : SRAE de Franche-Comté, p. 61.

— (déc. 2011). *Suivi Des Plans d'eau Des Bassins Rhône-Méditerranée et Corse En Application de La Directive Cadre Sur l'Eau (Sites de Référence, Réseau de Contrôle de Surveillance et Contrôle Opérationnel) - Note Synthétique d'interprétation Des Résultats - Lac de l'Abbaye (39 : Jura) - Campagnes 2010*. Rapp. tech. Agence de l'eau RMC - ONEMA, p. 20.

— (sept. 2013). *Identification Des Ressources Karstiques Majeures Pour l'alimentation En Eau Potable En Vue de Leur Protection Sur Une Partie Du Massif Du Jura - Volume N°1 : Rapport*. AERMC, p. 36.

— (sept. 2015a). *Diagnostic Agricole et Définition d'un Programme d'actions Visant à Limiter Les Pollutions Ponctuelles et Diffuses Sur Le Bassin Versant de l'Ain Amont*. Rapp. tech. Lons-le-Saunier : Chambre d'agriculture du Jura, p. 182.

— (jan. 2015b). *Suivi Des Plans d'eau Des Bassins Rhône-Méditerranée et Corse En Application de La Directive Cadre Sur l'Eau (Sites de Référence, Réseau de Contrôle de Surveillance et Contrôle Opérationnel) - Note Synthétique d'interprétation Des Résultats - Lac de l'Abbaye (39 : Jura) - Campagnes 2013*. Rapp. tech. Agence de l'eau RMC - ONEMA, p. 26.

Auguie, Baptiste (2017). *gridExtra : Miscellaneous Functions for "Grid" Graphics*. Version 2.3. URL : https://CRAN.R-project.org/package=gridExtra.

Barbe, Jacques (1982). « Peuplements Planctoniques et Ceintures Végétales Du Lac de l'Abbaye (Massif Du Jura) ». In : *Annales Scientifiques de l'Université de Franche-Comté - Biologie Végétale* 4ème série.Fascicule 3, p. 3-11.

Barbe, Jacques et al. (mai 2007). *Diagnose Du Lac de l'Abbaye (Jura)*. Rapp. tech. Lyon : CEMAGREF, p. 33.

Barbey, Bruno et al. (1990). « Recherches Sur La Macrofaune Benthique de Trois Lacs Jurassiens : Saint-Point, Abbaye, Clairvaux ». Mémoire de DESS "Eaux Continentales". Besançon : Université de Franche-Comté.

Belle, Simon, Laurent Millet et al. (juill. 2016). « Increase in Benthic Trophic Reliance on Methane in 14 French Lakes during the Anthropocene ». In : *Freshwater Biology* 61.7, p. 1105-1118. ISSN : 1365-2427. DOI : 10.1111/fwb.12771.

Belle, Simon, Claire Parent et al. (août 2014). « Temporal Changes in the Contribution of Methane-Oxidizing Bacteria to the Biomass of Chironomid Larvae Determined Using Stable Carbon Isotopes and Ancient DNA ». In : *Journal of Paleolimnology*, p. 1-14. ISSN : 0921-2728, 1573-0417. DOI : 10.1007/s10933-014-9789-z.

Belle, Simon, Valérie Verneaux et al. (2016). « Climate and Human Land-Use as a Driver of Lake Narlay (Eastern France, Jura Mountains) Evolution over the Last 1200 Years : Implication for Methane Cycle ». In : *Journal of Paleolimnology* 1.55, p. 83-96. ISSN : 0921-2728, 1573-0417. DOI : 10.1007/s10933-015-9864-0.

Bernard, M. et al. (1985). « Recherches Sur Les Sédiments de Six Lacs de Franche-Comté. Études Des Paramètres Physico-Chimiques Des Sédiments ». Mémoire de DESS "Eaux Continentales". Université de Franche-Comté.

Besson, Sylvain (2021). *Fiche Synthétique - État Du Peuplement Piscicole Du Lac de l'Abbaye (39) - Campagne 2020 de Pêche Aux Filets via Le Protocole CEN 14757*. Rapp. tech. Dijon : Office Français de la Biodiversité, p. 7.

Bidaut, Françoise et al. (1983). « Recherche Sur Les Sédiments et La Faune Benthique de Quatre Lacs Du Jura : Saint-Point, Clairvaux, l'Abbaye, Les Rousses ». Mémoire de DESS "Eaux Continentales". Université de Franche-Comté.

Bivand, Roger, Tim Keitt et Barry Rowlingson (2017). *Rgdal : Bindings for the Geospatial Data Abstraction Library*. Version 1.2-16. URL : https://CRAN.R-project.org/package=rgdal.

Bourgeot, François, Arnaud Olivetto et Philippe Prompt (nov. 2014). *Surveillance de La Qualité Des Plans d'eau Des Bassins Rhône Méditerranée Corse – Suivi 2013 – Rapport de Données et d'interprétation – Lac de l'Abbaye (Jura)*. Rapp. tech. 0704FB14. Agence de l'eau RMC, p. 38.

— (oct. 2017). *Surveillance de La Qualité Des Plans d'eau Des Bassins Rhône Méditerranée Corse – Suivi 2016 – Rapport de Données et d'interprétation – Lac de l'Abbaye (Jura)*. Rapp. tech. 1411FB17. Agence de l'eau RMC, p. 40.

— (oct. 2020). *Surveillance de La Qualité Des Plans d'eau Des Bassins Rhône Méditerranée Corse – Suivi 2019 – Rapport de Données et d'interprétation – Lac de l'Abbaye (Jura)*. Rapp. tech. 2310FB20. Agence de l'eau RMC, p. 40.

Bouvet, Nathalie (nov. 2008). *Le Lac de l'Abbaye (39) - Synthèse Écologique*. Rapp. tech. Agence de l'eau RMC - Conseil général du Jura, p. 61.

— (2013). *Suivi Des Paramètres Physiques de Quatres Lacs Utilisés à Des Fins d'alimentation En Eau Potable : Lacs de l'Abbaye, de Bellefontaine, Des Rousses et Du Trouillot*. Rapp. tech. Besançon : Parc Naturel Régional du Haut-Jura, p. 153.

Braud, Sandrine et Sandro Parussatti (1993). « Étude de La Macrofaune Benthique Du Lac de l'Abbaye Récoltée à l'aide de Substrats Artificiels. Expérimentation d'un Piège à Exuvies ». Mémoire de DESS "Eaux Continentales". Université de Franche-Comté.

Brevet, Sylvie (jan. 2017). *Diagnostic Agricole 2016 - SIE Du Grandvaux - Suivi de La Mise En Oeuvre de La DUP Sur Le Périmètre de Protection Rapprochée Du Captage Du Lac de l'Abbaye*. Rapp. tech. Syndicat Intercommunal des eaux du plateau des Rousses, p. 19.

Brient, Luc (juin 2019). *Étude Synthétique Des Données Sur Le Lac de l'Abbaye Vis-à-Vis de La Présence de Cyanobactéries*. Rapp. tech. Rennes : Université de Rennes 1, p. 7.

Bruslé, Jacques et Jean-Pierre Quignard (16 juill. 2013). *Biologie des poissons d'eau douce européens*. 2e édition. Paris : Tec & Doc Lavoisier. isbn : 978-2-7430-1496-4.

Buisson, Sandrine (2004). *Utilisation de La Paléolimnologie Pour La Détermination d'un État de Référence (Au Sens de La Directive-Cadre Européenne Sur l'Eau) Dans Les Lacs Du Bassin Rhône Méditerranée Corse*. Rapp. tech. Lyon : Agence de l'eau RMC, p. 79.

Chauris, H. (1992). « Étude Sur Les Formes Principales de La Matière Organique Des Sédiments Lacustres Du Jura - Lacs de l'Abbaye, Clairvaux, Ilay et Saint-Point ». Mémoire de DESS "Eaux Continentales". Université de Franche-Comté.

Cottet, Michel et François Jacquier (s. d.). « Faisons Le Point Sur "l'Enragé" ». In : ().

Dahl, David B. (2019). *Xtable : Export Tables to LaTeX or HTML*. Version 1.8-4. url : `https://CRAN.R-project.org/package=xtable` (visité le 01/02/2016).

Degiorgi, François, Jean-Claude Raymond et Jean-Pierre Grandmottet (2003). *Analysis of Quantitative Structures of the Lake Ichtyofauna by Standard Use of Vertical Nets*, p. 13.

Delebecque, André (1898). *Les lacs français*. Typographie Chamerot et Renouard. Paris.

Directive 2000/60/CE Du Parlement Européen et Du Conseil Du 23 Octobre 2000 Établissant Un Cadre Pour Une Politique Communautaire Dans Le Domaine de l'eau (23 oct. 2003).

DIREN de Franche-Comté (déc. 1999). « Le Lac de l'Abbaye ». In : *Les Lacs Du Département Du Jura et Leur Bassin Versant*. Besançon, p. 55-73.

DIREN Franche-Comté (oct. 1998). *Les Lacs Du Département Du Jura et Leur Bassin Versant - Synthèse Des Données - Propositions de Gestion*. Rapp. tech. Conseil Général du Jura - Agence de l'eau RMC - DIREN de Franche-Comté, p. 90.

Dunnington, Dewey et Edgar Ruiz (2018). *Ggspatial : Spatial Data Framework for Ggplot2*. Version 1.0.3. url : `https://CRAN.R-project.org/package=ggspatial`.

Environnement Canada (2007). *Critères Pour l'évaluation de La Qualité Des Sédiments Au Québec et Cadres d'application : Prévention, Dragage et Restauration*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, p. 39.

Essert, Valentin (2017). « Synthèse et Analyse de Données Physico-Chimiques Sur Les Lacs Du Département Du Jura ». Mémoire de Travail d'Étude et de Recherche. Lons-le-Saunier : Université de Franche-Comté.

— (2018). « Sources et Voies de Transfert Du Carbone Dans Les Réseaux Trophiques Pélagiques Lacustres d'après l'analyse Des Signatures Isotopiques Du Carbone Des

Daphnies et de Leurs Restes Subfossiles, Une Approche Combinée Néo- et Paléolimnologique. » These En Préparation. Bourgogne Franche-Comté.

Essert, Valentin, Hélène Masclaux, Valérie Verneaux, Emilie Lyautey et al. (août 2022). « Spatial and Seasonal Variability of the Carbon Isotopic Signature of *Daphnia* and Their Ephippia in Four French Lakes : Implications for the Study of Carbon Transfers in Lake Food Webs ». In : *Freshwater Biology* 67.8, p. 1439-1455. issn : 0046-5070, 1365-2427. doi : 10.1111/fwb.13952.

Essert, Valentin, Hélène Masclaux, Valérie Verneaux et Laurent Millet (juill. 2022). « Influence of Thermal Regime, Oxygen Conditions and Land Use on Source and Pathways of Carbon in Lake Pelagic Food Webs ». In : *Écoscience* 0.0, p. 1-18. issn : 1195-6860. doi : 10.1080/11956860.2022.2094630.

Fagot, Jean-Baptiste (2011). *Impacts de La Gestion Du Niveau Des Lacs Sur Leur Métabolisme et Sur Leurs Capacités Biogènes - Synthèse Bibliographique*. Besançon : Université de Franche-Comté, p. 34.

— (2013). *Diagnose Piscicole Du Lac de Chalain*. Rapp. tech. Lons-le-Saunier : Fédération du Jura pour la pêche et la protection du milieu aquatique, p. 50.

— (juill. 2016). *Diagnostic Piscicole et Propositions d'actions - Lac de Bonlieu (39)*. Rapp. tech. Lons-le-Saunier : Fédération du Jura pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique, p. 44.

— (jan. 2017a). *Lacs Du Département Du Jura - Observations Physico-Chimiques (2014)*. Rapp. tech. Lons-le-Saunier : Fédération du Jura pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique, p. 35.

— (fév. 2017b). *Lacs Du Département Du Jura - Observations Physico-Chimiques (2016)*. Rapp. tech. Lons-le-Saunier : Fédération du Jura pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique, p. 43.

— (mars 2018). *Inventaire Des Pressions Anthropiques et Analyse de Leurs Impacts Sur Les Milieux Aquatiques - Lac Des Rousses (39) - Rapport et Propositions d'action*. Rapp. tech. Lons-le-Saunier : FJPPMA, p. 66.

— (mars 2019). *Grand Lac de Clairvaux - Suivi Piscicole et Identification de La Contamination Toxique*. Rapp. tech. Lons-le-Saunier : Fédération du Jura pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique, p. 57.

— (mars 2020). *Lacs d'Ilay et Du Val - Suivi Piscicole*. Rapp. tech. Lons-le-Saunier : Fédération du Jura pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique, p. 53.

Geffroy, Sixtine (juin 2015). *Bilan Des Connaissances Sur l'état Écologique Du Lac de Remoray et de Son Bassin Versant*. Besançon : Réserve naturelle du lac de Remoray - Laboratoire Chrono-Environnement, p. 76.

Gimaret, Hervé (1988). « Bilan de La Macrofaune Benthique Récoltée Dans 14 Lacs Du Jura. Analyse En Fonction de La Profondeur ». Mémoire de DUEHH. Université de Franche-Comté.

Grac, C. et V. Maillard (1992). « Essai de Caractérisation Physico-Chimique de Quatre Lacs Du Jura : Abbaye, Bonlieu, Grand Clairvaux et Saint-Point - Classement de Neuf Lacs ». Mémoire de DESS "Eaux Continentales". Université de Franche-Comté.

Grandmottet, Jean-Pierre (1983). « Principales Exigences Des Téléostéens Dulcicoles Vis-à-Vis de l'habitat Aquatique ». In : *Annales scientifiques de l'Université de Franche-Comté* 4ème série, Fascicule 4, p. 3-25.

Grolemund, Garrett et Hadley Wickham (2011). « Dates and Times Made Easy with Lubridate ». In : *Journal of Statistical Software* 40.3, p. 1-25. url : http://core.kmi.open.ac.uk/download/pdf/6340242.pdf (visité le 10/03/2015).

Guery, Corinne et al. (1987). « Contribution à l'étude Des Sédiments Des Lacs Jurassiens (Abbaye, Clairvaux, Les Rousses) ». Mémoire de DESS "Eaux Continentales". Besançon : Université de Franche-Comté.

Hétier, M.-F. (1896). « Note Sur Quelques Plantes Rares Ou Nouvelles De La Flore Française Récoltées Dans Le Jura ». In : *Bulletin de la Société Botanique de France* 43.1, p. 66-70.

Irz, Pascal, Christine Argillier et Thierry Oberdorff (juill. 2004). « Native and Introduced Fish Species Richness in French Lakes : Local and Regional Influences ». In : *Global Ecology and Biogeography* 13.4, p. 335-344. issn : 1466-8238. doi : 10.1111/j.1466-822X.2004.00109.x.

Kahle, David et Hadley Wickham (2013). « Ggmap : Spatial Visualization with Ggplot2 ». In : *The R Journal* 5.1, p. 144-161. url : http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.375.8693&rep=rep1&type=pdf (visité le 01/02/2016).

Lafont, M., J. Juget et G. Rofes (1991). « Un Indice Biologique Lacustre Basé Sur l'examen Des Oligochètes ». In : *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science* 4.2, p. 253-268.

Lafont, Michel et J. Juget (1981). « Les Oligochètes de Quelques Lacs Jurassiens et Leur Utilisation Pour Apprécier l'état Biologique Des Sédiments Profonds ». In : *Annales Scientifiques de l'Université de Franche-Comté - Biologie animale* 4.2, p. 47-57.

Lamairesse, Pierre-Eugène (1873). *Études hydrologiques sur les monts Jura, mémoire*. Paris, France : Dunod.

Loi 2006-1772 Du 30 Décembre 2006 Sur l'eau et Les Milieux Aquatiques (30 déc. 2006).

Magnin, Antoine (1904). *Les lacs du Jura t.4 : Monographies botaniques de 74 lacs jurassiens : suivies de considération générales sur la végétation lacustre*. Paris, France : P. Klincksieck.

Magny, M. (1992). « Sédimentation et dynamique de comblement dans les lacs du Jura au cours des 15 derniers millénaires ». In : *Revue d'Archéométrie* 16.1, p. 27-49. issn : 0399-1237. doi : 10.3406/arsci.1992.890.

Magny, M., H. Richard et J. Evin (1988). « Nouvelle Contribution a l'histoire Holocène Des Lacs Du Jura Français : Recherches Sédimentologiques et Palynologiques Sur Les Lacs de Chalain, de Clairvaux et de l'Abbaye ». In : *Revue de Paléobiologie* 7, p. 11-23.

Magny, Michel (1992). « Holocene Lake-Level Fluctuations in Jura and the Northern Subalpine Ranges, France : Regional Pattern and Climatic Implications ». In : *Boreas* 21.4, p. 319-334.

— (1993). « Une Nouvelle Mise En Perspective Des Sites Archéologiques Lacustres : Les Fluctuations Holocènes Des Lacs Jurassiens et Subalpins ». In : *Gallia préhistoire* 35.1, p. 253-282. issn : 0016-4127. doi : 10.3406/galip.1993.2088.

— (2004). « Fluctuations Du Niveau Des Lacs Dans Le Jura, Les Préalpes Françaises Du Nord et Le Plateau Suisse, et Variabilité Du Climat Pendant l'Holocène ». In : *Méditerranée* 102.1, p. 61-70. issn : 0025-8296. doi : 10.3406/medit.2004.3341.

Martin, C. (1993). « Analyse Comparative Du Seston Estival de 9 Lacs Du Jura Français ». In : *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology* 29.03, p. 365-381. doi : 10.1051/limn/1993029.

— (1994). « Lacs de Franche-Comté (Massif Du Jura). Recherches Sur Le Seston, plus Particulièrement Sur Le Trypton Organique ». Thèse de Doctorat. Université de Franche-Comté.

— (s. d.). *Distribution et Évolution Des Nitrates Dans Les Lacs Jurassiens - Exploitation Des Suivis Physico-Chimiques*. Rapp. tech. Besançon : Laboratoire d'hydrobiologie du Centre Pluridisciplinaire d'Etude des Eaux Continentales de l'Université de Besançon, p. 16.

Mettetal, Jean-Pierre et al. (mai 1994). *Le Lac de l'Abbaye - Étude Hydrologique et Hydro-Chimique*. Rapp. tech. Besançon : DIREN Franche-Comté, p. 44.

Moilleron, R. et al. (1996). « HPLC and Ninhydrin Photometric Determination of Amino Acids in CaCO3 Rich Lacustrine Sediments of the Jura Region, France. » In : *Annales De Limnologie-International Journal of Limnology* 32.3, p. 197-204. issn : 0003-4088. doi : 10.1051/limn/1996018.

Moreau, H. (1922). « Les Forces Hydrauliques Dans Le Département Du Jura ». In : *Société d'émulation du Jura* 11è série.1er volume, p. 91-106.

Mouthon, J. (jan. 1986). « Principes Généraux Pour Une Méthode d'appréciation de La Qualité Globale Des Sédiments Lacustres à l'aide d'une Analyse Simplifiée Des Malacocénoses ». In : *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology* 22.03, p. 209-217. issn : 2100-000X. doi : 10.1051/limn/1986019.

— (1989). « Analyse de La Distribution Des Malacocénoses de 23 Lacs Français ». In : *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology* 25.03, p. 205-213. doi : 10.1051/limn/1989021.

— (1992). « Peuplements Malacologiques Lacustres En Relation Avec La Physico-Chimie de l'eau et Des Sédiments. II. Les Espèces ». In : *Annales de Limnologie* 28.2, p. 109-119.

— (1993). « Un Indice Biologique Lacustre Basé Sur l'examen Des Peuplements de Mollusques ». In : *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 331, p. 397-406. issn : 0767-2861. doi : 10.1051/kmae:1993005.

Mouthon, Jacques (1981). « Les Mollusques Des Lacs de l'Abbaye et Des Rousses ». In : *Annales Scientifiques de l'Université de Franche-Comté - Biologie animale* 4e série.Fascicule 2, p. 1-15.

— (oct. 1992). « Snail and Bivalve Populations Analysed in Relation to Physico-Chemical Quality of Lakes in Eastern France ». In : *Hydrobiologia* 245.3, p. 147-156. issn : 0018-8158, 1573-5117. doi : 10.1007/BF00006155.

Munch, Laetitia et Jean-Claude Raymond (juill. 2015). *Contribution à l'évaluation de l'altération Hydromorphologique Des Plans d'eau Des Bassins Rhône-Méditerranée et Corse - Application Des Protocoles AlBer et CHaRLi - Rapport Final*. Rapp. tech. Thonon-les-Bains : ONEMA.

Nedjai, Rachid, N. Messaoud Nacer et Martine Lanson (avr. 2012). « A History of Lead Pollution in Nine Lakes in the Franche-Comté Region, Eastern France, through the Analysis of Lakebed Sediments ». In : *Internationale Journal of Water Resources and Environment Management* 1.2, p. 119-133.

Pebesma, Edzer (2018). « Simple Features for R : Standardized Support for Spatial Vector Data ». In : *The R Journal*. url : https://journal.r-project.org/archive/2018/RJ-2018-009/index.html.

Pebesma, Edzer, Thomas Mailund et James Hiebert (2016). « Measurement Units in {R} ». In : *The R Journal* 8.2, p. 486-494. url : https://journal.r-project.org/archive/2016-2/pebesma-mailund-hiebert.pdf.

Périat, Guy, Pascal Vonlanthen et Daniel Schlunke (nov. 2017). *Étude Diagnostique et de Gestion Durable Du Lac de l'Abbaye*. Rapp. tech. Grande Rivière : Alain Piot, p. 13.

Péricat, Audrey et Hervé Coppin (sept. 2011). *Étude Des Plans d'eau Du Programme de Surveillance Des Bassins Rhône-Méditerranée et Corse - Rapport de Données Brutes et Interprétations - Lac de l'Abbaye - Suivi Annuel 2010*. Rapp. tech. 08-283/2011-PE2010-07. Agence de l'eau RMC, p. 46.

Peta, D. et F. Gentet (1990). « Étude Des Formes de La Matière Organique de Trois Lacs Jurassiens : Clairvaux ; Abbaye, Saint Point ». Mémoire de DESS "Eaux Continentales". Université de Franche-Comté.

Philot, David (juin 2021). *Arrêté Préfectoral 2021-06-09-001 Portant Approbation Du Plan Départemental Pour La Protection Du Milieu Aquatique et La Gestion Des Ressources Piscicoles (PDPG) 2021-2015*.

Porteret, Vincent et N. Roset (1994). « Étude Du Macrobenthos Du Lac de l'Abbaye - Mise Au Point d'un Protocole d'échantillonnage à l'aide de Substrats Artificiels et de Pièges à Exuvies Nymphale ». Mémoire de DESS "Eaux Continentales". Université de Franche-Comté.

PostGIS (2017). Version 2.4.0. url : `https://postgis.net/`.

PostgreSQL Global Development Group (5 oct. 2017). *PostgreSQL*. Version 10. url : `https://postgresql.org/`.

QGIS Development Team (13 sept. 2019). *QGIS Geographic Information System*. Version 3.8.3. Open Source Geospatial Foundation. url : `http://www.qgis.org`.

R Core Team (11 mars 2019). *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. Version 3.5.3. Vienne, Autriche : R Foundation for Statistical Computing. url : `http://www.R-project.org/`.

RStudio Team (2019). *RStudio : Integrated Development for R. RStudio*. Version 1.2.5001. Boston, MA : RStudio, Inc. url : `http://www.rstudio.com/`.

Schaefer, Otto (juin 2009). *Étude et Cartographie de La Flore et de La Végétation Du Lac de l'Abbaye (Jura)*. Rapp. tech. Besançon : Conservatoire Botanique National de Franche Comté, p. 109.

Schlumberger, Olivier, Nadou Cadic et al. (2001). « Les Peuplements Piscicoles En Lacs : Assemblages Types et Niveaux d'eutrophisation ». In : *Ingénieries-EAT* 28, p. 23-35.

Schlumberger, Olivier et Pierre Élie (2008). *Poissons des lacs naturels français : écologie et évolution des peuplements*. 1 t. Versailles : Quae. 211 p. isbn : 978-2-7592-0030-6.

Schlumberger, Olivier et Patrick Girard (2013). *Mémento de pisciculture d'étang*. 5ème édition. 1 t. Versailles : Éditions Quae. 222 p. isbn : 978-2-7592-1895-0.

Slowikowski, Kamil (2019). *Ggrepel : Automatically Position Non-Overlapping Text Labels with 'Ggplot2'*. Version 0.8.1. url : `https://CRAN.R-project.org/package=ggrepel`.

Verneaux, J, A Schmitt et V Verneaux (1995). « Classification Biologique Des Lacs Jurassiens à l'aide d'une Nouvelle Méthode d'analyse Des Peuplements Benthiques III. Relations Entre Données Biologiques et Variables Du Milieu ». In : *Annals of Limnology* 31, p. 277-286.

Verneaux, J, V Verneaux et A Guyard (1993a). « Classification Biologique Des Lacs Jurassiens à l'aide d'une Nouvelle Méthode d'analyse Des Peuplements Benthiques I. Variété et Densité de La Faune ». In : *Annals of Limnology* 29, p. 59-77.

— (1993b). « Classification Biologique Des Lacs Jurassiens à l'aide d'une Nouvelle Méthode d'analyse Des Peuplements Benthiques II. Nature de La Faune ». In : *Annals of Limnology* 29, p. 383-393.

Verneaux, J. et al. (1991). « Particules Organiques et Rapport C/N Des Sédiments Des Lacs Du Jura ». In : *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology* 27.02, p. 175-190. doi : 10.1051/limn/1991014.

Verneaux, Jean (1980). « Fondements Biologiques et Écologiques de l'étude de La Qualité Des Eaux Continentales. Principes et Méthodes ». In : *La Pollution Des Eaux Continentales*. Gauthiers-Villards, p. 289-345.

Verneaux, V. et Lotfi Aleya (1999). « Comparaison Des Peuplements Chironomidiens Du Lac de l'Abbaye Obtenus Par Différentes Méthodes d'échantillonnage. Intérêts de La Récolte Des Exuvies Nymphales ». In : *Revue des sciences de l'eau* 12.1, p. 45-63. issn : 0992-7158.

Verneaux, Valérie et Lotfi Aleya (mai 1998a). « Bathymetric Distributions of Chironomid Communities in Ten French Lakes : Implications on Lake Classification ». In : *Archiv für Hydrobiologie* 142.2, p. 209-228.

— (1998b). « Spatial and Temporal Distribution of Chironomid Larvae (Diptera : Nematocera) at the Sediment–Water Interface in Lake Abbaye (Jura, France) ». In : *Hydrobiologia* 373–374, p. 169-180.

Verneaux, Valérie, Jean Verneaux, A Schmitt et al. (2004). « The Lake Biotic Index (LBI) : An Applied Method for Assessing the Biological Quality of Lakes Using Macrobenthos ; the Lake Châlain (French Jura) as an Example ». In : *Annales de Limnologie* 40, p. 1-9.

Verneaux, Valérie, Jean Verneaux, Aimé Schmitt et al. (juin 2004). « Relationships of Macrobenthos with Dissolved Oxygen and Organic Matter at the Sediment-Water Interface in Ten French Lakes ». In : *Archiv für Hydrobiologie* 160.2, p. 247-259. issn : 00039136. doi : 10.1127/0003-9136/2004/0160-0247.

Vidonne, A. et al. (1988). « Utilisation d'un «indice de Réflexion» Pour l'analyse Rapide Des Sédiments Lacustres ». In : *Revue des Sciences de l'Eau* 1.3, p. 239-251.

Virieux, J. (1916). *Annales de biologie lacustre. Recherches sur le plancton des lacs du Jura central*. T. Tome VIII (1914-1915). Extrait des "Annales de Biologie lacustre". Bruxelles, Belgique : Breuer.

Wickham, Hadley et al. (2007). « Reshaping Data with the Reshape Package ». In : *Journal of Statistical Software* 21.12, p. 1-20. url : http://www.had.co.nz/reshape/introduction.pdf (visité le 01/02/2016).

Wickham, Hadley (2009). *Ggplot2 : Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer New York. 212 p. isbn : 978-0-387-98140-6. url : http://had.co.nz/ggplot2/book.

Wickham, Hadley et al. (2011). « The Split-Apply-Combine Strategy for Data Analysis ». In : *Journal of Statistical Software* 40.1, p. 1-29. url : http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.182.5667&rep=rep1&type=pdf (visité le 01/02/2016).

Wickham, Hadley (2017). *Tidyverse : Easily Install and Load 'Tidyverse' Packages*. Version 1.2.1. url : https://cran.r-project.org/web/packages/tidyverse/index.html.

— (2018a). *Scales : Scale Functions for Visualization*. Version 1.0.0. url : https://CRAN.R-project.org/package=scales.

— (2018b). *Stringr : Simple, Consistent Wrappers for Common String Operations*. Version 1.3.1. url : https://CRAN.R-project.org/package=stringr.

Wickham, Hadley et Jennifer Bryan (2019). *Readxl : Read Excel Files*. Version 1.3.1. url : https://CRAN.R-project.org/package=readxl.

Wickham, Hadley, Romain François et al. (2019). *Dplyr : A Grammar of Data Manipulation*. Version 0.8.3. URL : http://CRAN.R-project.org/package=dplyr.

Wickham, Hadley et Lionel Henry (2019). *Tidyr : Tidy Messy Data*. Version 1.0.0. URL : https://CRAN.R-project.org/package=tidyr.

Wickham, Hadley et Edgar Ruiz (2019). *Dbplyr : A 'dplyr' Back End for Databases*. Version 1.4.2. URL : https://CRAN.R-project.org/package=dbplyr.

Wilke, Claus O. (2019). *Cowplot : Streamlined Plot Theme and Plot Annotations for 'Ggplot2'*. Version 1.0.0. URL : https://CRAN.R-project.org/package=cowplot.

Xie, Yihui (2019). *Knitr : A General-Purpose Package for Dynamic Report Generation in R*. Version 1.25. URL : http://cran.r-project.org/web/packages/knitr/index.html.

8 Annexes

Table .0.1 – Récapitulatif des effectifs capturés dans le lac de l'Abbaye (en nombre d'individus)

Espèce	CENb	CENp	EBP	FVL	FVS	Total
BRO	2		10			12
GAR	335	58	13	48	39	493
OCL	9			9	1	19
PER	161	1	192	33	12	399
PES			8			8
ROT	133	67	34	112	35	381
TAN			2			2
Total	640	126	259	202	87	1314

Table .0.2 – Récapitulatif des biomasses capturées dans le lac de l'Abaye (en kg)

Espèce	CENb	CENp	EBP	FVL	FVS	Total
BRO	0.50		6.77			7.27
GAR	10.27	2.02	0.16	1.44	2.87	16.76
OCL	0.11			0.17	0.01	0.29
PER	8.59	0.01		0.61	0.21	9.42
PES			0.04			0.04
ROT	6.74	1.32	0.67	5.81	1.04	15.59
TAN			0.04			0.04
Total	26.22	3.34	7.68	8.02	4.13	49.40

.1 Informations techniques

```
## - Session info ---------------------------------------------------------------
##  setting  value
##  version  R version 4.2.2 (2022-10-31)
##  os       macOS Monterey 12.6.3
##  system   aarch64, darwin20
##  ui       X11
##  language (EN)
##  collate  fr_FR.UTF-8
##  ctype    en_US.UTF-8
##  tz       Europe/Paris
##  date     2023-02-09
##  pandoc   NA
##
## - Packages -------------------------------------------------------------------
##  package       * version date (UTC) lib source
##  afd39         * 0.0.16  2022-09-21 [1] Github (jbfagotfede39/afd39@8a8abf3)
##  aquatools     * 0.0.148 2023-01-26 [1] Github (jbfagotfede39/aquatools@84021ad)
##  assertthat      0.2.1   2019-03-21 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  backports       1.4.1   2021-12-13 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  bitops          1.0-7   2021-04-24 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  blob            1.2.3   2022-04-10 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  broom           1.0.1   2022-08-29 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  cachem          1.0.6   2021-08-19 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  callr           3.7.3   2022-11-02 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  cellranger      1.1.0   2016-07-27 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  class           7.3-20  2022-01-16 [2] CRAN (R 4.2.2)
##  classInt        0.4-8   2022-09-29 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  cli             3.4.1   2022-09-23 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  codetools       0.2-18  2020-11-04 [2] CRAN (R 4.2.2)
##  colorspace      2.0-3   2022-02-21 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  cowplot       * 1.1.1   2020-12-30 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  crayon          1.5.2   2022-09-29 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  DBI             1.1.3   2022-06-18 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  dbplyr        * 2.2.1   2022-06-27 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  devtools        2.4.5   2022-10-11 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  digest          0.6.30  2022-10-18 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  dplyr         * 1.0.10  2022-09-01 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  e1071           1.7-12  2022-10-24 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  ellipsis        0.3.2   2021-04-29 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  evaluate        0.18    2022-11-07 [2] CRAN (R 4.2.2)
##  fansi           1.0.3   2022-03-24 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  farver          2.1.1   2022-07-06 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  fastmap         1.1.0   2021-01-25 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  forcats       * 0.5.2   2022-08-19 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  fs              1.5.2   2021-12-08 [2] CRAN (R 4.2.0)
```

```
##  FSA            0.9.3   2022-02-18 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  gargle         1.2.1   2022-09-08 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  generics       0.1.3   2022-07-05 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  ggmap        * 3.0.1   2022-11-03 [2] CRAN (R 4.2.2)
##  ggplot2      * 3.4.0   2022-11-04 [2] CRAN (R 4.2.2)
##  ggrepel      * 0.9.1   2021-01-15 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  ggspatial    * 1.1.6   2022-07-08 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  glue         * 1.6.2   2022-02-24 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  googledrive    2.0.0   2021-07-08 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  googlesheets4  1.0.1   2022-08-13 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  gridExtra    * 2.3     2017-09-09 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  gtable         0.3.1   2022-09-01 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  haven          2.5.1   2022-08-22 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  highr          0.9     2021-04-16 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  hms            1.1.2   2022-08-19 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  htmltools      0.5.3   2022-07-18 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  htmlwidgets    1.5.4   2021-09-08 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  httpuv         1.6.6   2022-09-08 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  httr           1.4.4   2022-08-17 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  jpeg           0.1-9   2021-07-24 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  jsonlite       1.8.3   2022-10-21 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  KernSmooth     2.23-20 2021-05-03 [2] CRAN (R 4.2.2)
##  keyring        1.3.1   2022-10-27 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  knitr        * 1.40    2022-08-24 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  labeling       0.4.2   2020-10-20 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  later          1.3.0   2021-08-18 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  lattice        0.20-45 2021-09-22 [2] CRAN (R 4.2.2)
##  lifecycle      1.0.3   2022-10-07 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  logr           1.3.3   2022-09-06 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  lubridate    * 1.9.0   2022-11-06 [2] CRAN (R 4.2.2)
##  magrittr       2.0.3   2022-03-30 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  memoise        2.0.1   2021-11-26 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  mime           0.12    2021-09-28 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  miniUI         0.1.1.1 2018-05-18 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  modelr         0.1.9   2022-08-19 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  munsell        0.5.0   2018-06-12 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  openxlsx       4.2.5.1 2022-10-24 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  pillar         1.8.1   2022-08-19 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  pkgbuild       1.3.1   2021-12-20 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  pkgconfig      2.0.3   2019-09-22 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  pkgload        1.3.1   2022-10-28 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  plyr           1.8.7   2022-03-24 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  png            0.1-7   2013-12-03 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  prettyunits    1.1.1   2020-01-24 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  processx       3.8.0   2022-10-26 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  profvis        0.3.7   2020-11-02 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  promises       1.2.0.1 2021-02-11 [2] CRAN (R 4.2.0)
##  proxy          0.4-27  2022-06-09 [2] CRAN (R 4.2.0)
```

```
## ps              1.7.2   2022-10-26 [2] CRAN (R 4.2.0)
## purrr         * 0.3.5   2022-10-06 [2] CRAN (R 4.2.0)
## R6              2.5.1   2021-08-19 [2] CRAN (R 4.2.0)
## raster          3.6-3   2022-09-18 [2] CRAN (R 4.2.0)
## RColorBrewer    1.1-3   2022-04-03 [2] CRAN (R 4.2.0)
## Rcpp            1.0.9   2022-07-08 [2] CRAN (R 4.2.0)
## RcppRoll        0.3.0   2018-06-05 [2] CRAN (R 4.2.0)
## readr         * 2.1.3   2022-10-01 [2] CRAN (R 4.2.0)
## readxl        * 1.4.1   2022-08-17 [2] CRAN (R 4.2.0)
## remotes         2.4.2   2021-11-30 [2] CRAN (R 4.2.0)
## renv            0.15.5  2022-05-26 [1] CRAN (R 4.2.0)
## reprex          2.0.2   2022-08-17 [2] CRAN (R 4.2.0)
## reshape2      * 1.4.4   2020-04-09 [2] CRAN (R 4.2.0)
## rgeoapi         1.1.0   2022-11-10 [2] Github (colinfay/rgeoapi@684f090)
## RgoogleMaps     1.4.5.3 2020-02-12 [2] CRAN (R 4.2.0)
## rjson           0.2.21  2022-01-09 [2] CRAN (R 4.2.0)
## rlang           1.0.6   2022-09-24 [2] CRAN (R 4.2.0)
## RPostgreSQL     0.7-4   2022-08-09 [2] CRAN (R 4.2.0)
## rstudioapi      0.14    2022-08-22 [2] CRAN (R 4.2.0)
## rvest           1.0.3   2022-08-19 [2] CRAN (R 4.2.0)
## s2              1.1.0   2022-07-18 [2] CRAN (R 4.2.0)
## scales        * 1.2.1   2022-08-20 [2] CRAN (R 4.2.0)
## sessioninfo     1.2.2   2021-12-06 [2] CRAN (R 4.2.0)
## sf            * 1.0-8   2022-07-14 [2] CRAN (R 4.2.0)
## shiny           1.7.3   2022-10-25 [2] CRAN (R 4.2.0)
## sp              1.5-1   2022-11-07 [2] CRAN (R 4.2.2)
## stringi         1.7.8   2022-07-11 [2] CRAN (R 4.2.0)
## stringr       * 1.4.1   2022-08-20 [2] CRAN (R 4.2.0)
## terra           1.6-17  2022-09-10 [2] CRAN (R 4.2.0)
## testit          0.13    2021-04-14 [2] CRAN (R 4.2.0)
## this.path       1.0.1   2022-09-23 [2] CRAN (R 4.2.0)
## tibble        * 3.1.8   2022-07-22 [2] CRAN (R 4.2.0)
## tidyr         * 1.2.1   2022-09-08 [2] CRAN (R 4.2.0)
## tidyselect      1.2.0   2022-10-10 [2] CRAN (R 4.2.0)
## tidyverse     * 1.3.2   2022-07-18 [2] CRAN (R 4.2.0)
## timechange    * 0.1.1   2022-11-04 [2] CRAN (R 4.2.2)
## tzdb            0.3.0   2022-03-28 [2] CRAN (R 4.2.0)
## units         * 0.8-0   2022-02-05 [2] CRAN (R 4.2.0)
## urlchecker      1.0.1   2021-11-30 [2] CRAN (R 4.2.0)
## usethis         2.1.6   2022-05-25 [2] CRAN (R 4.2.0)
## utf8            1.2.2   2021-07-24 [2] CRAN (R 4.2.0)
## vctrs           0.5.0   2022-10-22 [2] CRAN (R 4.2.0)
## withr           2.5.0   2022-03-03 [2] CRAN (R 4.2.0)
## wk              0.7.0   2022-10-13 [2] CRAN (R 4.2.0)
## wkb             0.4-0   2019-12-05 [2] CRAN (R 4.2.0)
## xfun            0.34    2022-10-18 [2] CRAN (R 4.2.0)
## xml2            1.3.3   2021-11-30 [2] CRAN (R 4.2.0)
## xtable        * 1.8-4   2019-04-21 [2] CRAN (R 4.2.0)
```

```
##  zip             2.2.2   2022-10-26 [2] CRAN (R 4.2.0)
##
##  [1] /Users/jean-baptistefagot/Desktop/Calculs_R/2022_Rapport_suivi_piscicole_lac_
##  [2] /Library/Frameworks/R.framework/Versions/4.2-arm64/Resources/library
##
## ------------------------------------------------------------------------------
```