HAL
open science

Les plans d'eau face aux changements climatiques

Cristina Ribaudo, Pierre Anschutz, Florent Arthaud, Pascal Bartout, Vincent Bertrin, G. Bourguetou, Yohana Cabaret, Nathalie Caill-Milly, Christophe Cassou, Olivier Douez, et al.

To cite this version:

Cristina Ribaudo, Pierre Anschutz, Florent Arthaud, Pascal Bartout, Vincent Bertrin, et al.. Les plans d'eau face aux changements climatiques. Acclimaterra, pp.56, 2021, Cahier Thématique n°1, 978-2-9574665-1-1. hal-03484549

HAL Id: hal-03484549

https://hal.inrae.fr/hal-03484549

Submitted on 17 Dec 2021

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

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

RÉGION Nouvelle-Aquitaine

CAHIER N°1

LES PLANS D'EAU FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

ACCLIMATERRA
COMITÉ SCIENTIFIQUE RÉGIONAL SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

LES PLANS D'EAU FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Édito

©Alban Gilbert

Consciente depuis de nombreuses années des enjeux liés au changement climatique et de l'urgence d'agir, la Région Nouvelle-Aquitaine a enclenché avec AcclimaTerra un travail scientifique de grande envergure, afin de développer la connaissance à l'échelle régionale, et d'appuyer l'action publique sur l'expertise scientifique. Cette démarche est essentielle pour agir avec discernement et efficacité, et les travaux de ce comité scientifique sont un des socles de l'action régionale pour la transition écologique et énergétique. Je suis heureux que le comité AcclimaTerra poursuive aujourd'hui ses travaux et son action de sensibilisation par des cahiers thématiques qui approfondissent certains sujets et en explorent la complexité, alimentant la réflexion et la recherche de pistes d'action.

L'eau, c'est la vie. La Région Nouvelle-Aquitaine est pourvue d'un grand nombre d'écosystèmes aquatiques liés à ses caractéristiques géographiques naturelles mais aussi à l'histoire et au présent de son occupation humaine. Les plans d'eau sont fournisseurs de très nombreux services aux sociétés humaines de notre Région : supports de la biodiversité, régulateurs des écoulements et réservoirs d'eau et sources d'énergie, valeurs paysagères et lieux de loisirs.

AcclimaTerra nous a montré l'ampleur du déficit hydrique qui menace notre Région. C'est à nous de le réduire en partie et de nous y adapter. Les plans d'eau sont une partie de la réponse, ils sont fragiles, nous devons les protéger, voire les régénérer. La connaissance est essentielle. Elle nous apprend que nous devons réduire la pression sur les ressources naturelles, que chaque changement dans l'un de ces milieux impacte le milieu voisin et bien plus loin. Appliquons-nous à garder intacts ou à restaurer ces habitats aquatiques porteurs de solutions pour notre avenir.

L'interconnexion des enjeux environnementaux montre à quel point il est nécessaire de définir une trajectoire de transition globale, et la Région Nouvelle-Aquitaine a relevé le défi avec la feuille de route Néo Terra adoptée en juillet 2019. Avec Néo Terra, nous accélérons pour mener une action systémique, structurée autour de 11 grandes ambitions, avec des objectifs précis : engagement citoyen, agroécologie, mutation des entreprises, transition énergétique, mobilités propres, urbanisme résilient, traitement des déchets, préservation de la biodiversité, protection des ressources naturelles et de l'eau en particulier, sanctuarisation des terres agricoles et forestières. Le Conseil régional mobilise ainsi toutes ses compétences, et tous les acteurs de la Nouvelle-Aquitaine, pour converger vers une véritable mutation écologique et inventer une société et une économie résilientes et solidaires.

Alain ROUSSET
Président du Conseil régional
de Nouvelle-Aquitaine

Édito

C'est un grand plaisir de présenter les « cahiers », qui sont proposés par AcclimaTerra à l'issue d'un long travail. Il s'agit d'une série qui s'étoffera au fil du temps : d'autres projets devraient être finalisés en 2022. Ils traduisent la volonté de rester en phase avec un monde, des enjeux, des transitions qui sont plus que jamais en évolution très rapide. Les deux rapports d'AcclimaTerra, de 2013, portant sur l'Aquitaine, et de 2018, portant sur la Nouvelle-Aquitaine, gardent une grande pertinence dans beaucoup de domaines : ils continuent et continueront encore à nourrir des réflexions qui sont nécessaires à l'échelle de la région. Mais ils ne suffisent pas à rendre compte de l'évolution de cette région et plusieurs thèmes ont été identifiés pour les compléter et les actualiser. Ils ont été initiés, soit par le « bureau » d'AcclimaTerra, soit dans un cadre plus large, traduisant des initiatives plus spontanées.

Ces deux premiers cahiers abordent des sujets qui peuvent apparaitre très différents, mais ils ont un point commun très fort : ils touchent tous à la transition environnementale. Par ailleurs ils témoignent aussi d'une réalité souvent oubliée : la quête du savoir scientifique est toujours très difficile à collecter et à mettre en œuvre, et plus encore dans le cadre évolutif actuel. Cependant, le travail collectif et l'investissement personnel d'un nombre important de chercheurs de différents organismes se voient reflétés dans cet ouvrage.

Ce cahier consacré à l'étude des plans d'eau (lacs, étangs, retenues) concerne un domaine scientifique qui est resté partiellement orphelin dans les analyses réalisées jusqu'à présent par AcclimaTerra. C'est pourtant un élément d'une grande importance : il existe 119 208 plans d'eau répertoriés en région Nouvelle-Aquitaine, et leur gestion, qui dépend de paramètres variés, met en jeu des facteurs physiques, biochimiques et sociaux. Il s'agit par ailleurs d'enjeux qui se trouvent régulièrement au cœur de débats difficiles, et qu'il est nécessaire d'objectiver au mieux. Ce travail jouera un rôle important dans la gestion environnementale de la région.

Hervé LE TREUT
Président d'AcclimaTerra

Préface

Les plans d'eau sont des écosystèmes complexes, multifonctionnels et, en même temps, fragiles.

Ces milieux aquatiques fournissent de nombreux services écosystémiques, en assurant des fonctions de support (production primaire, biodiversité), de régulation (épuration des nutriments, régulation des flux hydriques), d'approvisionnement (eau potable, irrigation, énergie) et socio-culturels (loisir, tourisme). Souvent perçus à tort comme immuables, stables et en dehors de toute pression, les plans d'eau font l'objet de multiples usages anthropiques, impactant leur fonctionnement. Le changement climatique en cours ne fait qu'exacerber ces impacts et accélérer la dégradation des milieux ; à l'échelle régionale, ses effets restent encore à évaluer.

Dans cet ouvrage, nous avons souhaité illustrer, de la manière la plus large possible, la variété des systèmes lentiques présents en Nouvelle-Aquitaine, ainsi que les lacunes de connaissance que diverses études mettent en évidence. Le but de cet ouvrage est d'apporter des éclairages scientifiques pour l'aide à la décision et aux choix politiques, et d'accompagner l'appropriation citoyenne des connaissances. Notre souhait ultime serait que ces lieux emblématiques, source de bien-être et de services, puissent continuer à recouvrir leurs rôles fonctionnels dans le futur.

Coordination : **Cristina Ribaudo**

Rédaction : **Pierre Anschutz, Pascal Bartout, Vincent Bertrin, Guillaume Bourguetou, Yohana Cabaret, Christophe Cassou, Olivier Douez, Alain Dupuy, Lionel Fournier, Alix Gilles-Bon, Gilles Guibaud, Frédéric Hoffmann, Aurélien Jamoneau, Frédéric Labat, Christophe Laplace-Treyture, Hervé Le Treut, Soizic Morin, François Prud'homme, Alexandre Pryet, Frank Quenault, Cristina Ribaudo, Jean-Michel Soubeyroux, Mohamed Taabni, Laurent Touchart, Andoni Zuazo**

Relecture : **Florent Arthaud, Alain Dutartre, Gabrielle Thiébaut, Juliette Tison-Rosebery ainsi que des membres du Conseil d'Administration d'AcclimaTerra : Nathalie Caill-Milly et Bernard Legube.**

Sommaire

Préface 08

Glossaire 10

1 • Présentation générale des plans d'eau de Nouvelle-Aquitaine 12
- **1.1** Des régionalisations de plans d'eau 14
- **1.2** Des familles de plans d'eau 15
- **1.3** La gestion des ressources en eau 17
- ENCART Les conflits liés à la continuité écologique et au débit en rivière 19

2 • Fonctionnement des plans d'eau 20
- **2.1** Les bilans hydrique et hydrologique 21
- **2.2** Les communautés biologiques et leur rôle fonctionnel 22
- **2.3** L'eutrophisation et le lien avec le bassin versant 24
- ENCART Le risque de comblement et sa gestion 25
- **2.4** Le régime des vents, l'hydrodynamique et la stratification des eaux 26

3 • Impacts du changement climatique 28
- **3.1** Les différents scénarios 29
- **3.2** Conséquences sur le fonctionnement physique et chimique 33
- ENCART Les cyanobactéries et le changement climatique 35
- **3.3** Conséquences sur la faune et la flore 36
- ENCART Des impacts cumulés : l'exemple des retenues 40

Conclusions 42

Bibliographie 44

Contributeurs 54

Glossaire

*Les mots suivants sont indiqués par un * lors de la première apparition dans le texte.*

Assec : Indiquant l'état d'une rivière ou d'un plan d'eau où il n'y a plus d'eau.

Allochtone : Ici utilisé pour indiquer un organisme ou une matière provenant d'un habitat ou d'un système extérieur au plan d'eau.

Anoxie, anoxique : Absence d'oxygène, dépourvu d'oxygène.

Biotope : Lieu de vie défini par des caractéristiques chimiques et physiques uniformes, qui héberge la biocénose, c'est-à-dire l'ensemble des organismes vivants (faune, flore, champignons, bactéries).

Colmatage, comblement : Sédimentation de matières minérales et organiques réduisant la profondeur d'un plan d'eau et conduisant progressivement à sa transformation en zone humide.

Colonne d'eau : Volume d'eau compris entre la surface et le fond du plan d'eau.

Étang : Plan d'eau peu profond et peu étendu, de taille intermédiaire entre le lac et la mare, d'origine naturelle ou artificielle, équipé d'un système de vidange ou non.

Eutrophe : Indique un milieu riche en nutriments. Un plan d'eau eutrophe sera généralement caractérisé par des eaux troubles et par une présence importante de végétaux aquatiques (micro-algues ou plantes).

Fetch : Distance en eau libre le long de laquelle le vent souffle sans obstacle, dans une direction donnée, entre un point du lac et la rive.

Lac : Plan d'eau profond et étendu (> 100 ha), d'origine naturelle ou artificielle, caractérisé le plus souvent par une stratification durable. Selon la plupart des auteurs, la profondeur maximale est supérieure à 5-7 m [1].

Lentique : Caractérisant un milieu aquatique aux eaux calmes.

Limnicité étendue : Part en eau de tous types de plan d'eau d'un territoire [2].

Limnologie : Science ayant pour objet l'étude des lacs et des autres plans d'eau continentaux.

Lotique : Caractérisant un milieu aquatique aux eaux courantes.

Mare : Étendue d'eau stagnante peu profonde (pérenne ou non, naturelle ou non) et de faible superficie (quelques dizaines ou centaines de m²), généralement sans évacuation.

Masse d'eau :

- **Sens administratif :** « Masse d'eau de surface » : une partie distincte et significative des eaux de surface telles qu'un lac, un réservoir, une rivière, un fleuve ou un canal, une partie de rivière, de fleuve ou de canal, une eau de transition ou une portion d'eaux côtières [3].
- **Sens scientifique :** En océanographie et en limnologie*, il s'agit d'un volume d'eau caractérisé par sa densité, elle-même dépendant de sa température et de sa salinité. Les discontinuités étant en général des plans horizontaux, les masses d'eau se superposent en strates.

Moine hydraulique : Système de vidange et de gestion du niveau d'eau, généralement présent dans les étangs.

Oligotrophe : Indique un milieu pauvre en nutriments. Un plans d'eau oligotrophe sera généralement caractérisé par des eaux transparentes et par une faible diversité spécifique.

Stratification thermique d'un lac : Étagement vertical des couches d'eau de température, donc de densité, différentes correspondant à :

- **Epilimnion (ou couche épilimnétique) :** couche d'eau superficielle la moins dense ;
- **Hypolimnion (ou couche hypolimnétique) :** couche d'eau profonde la plus dense ;
- **Métalimnion :** couche d'eau intermédiaire dans laquelle la température décroît rapidement en fonction de la profondeur.

PLANS D'EAU

NOMBRE DE PLANS D'EAU
119 208 plans d'eau
en Nouvelle-Aquitaine

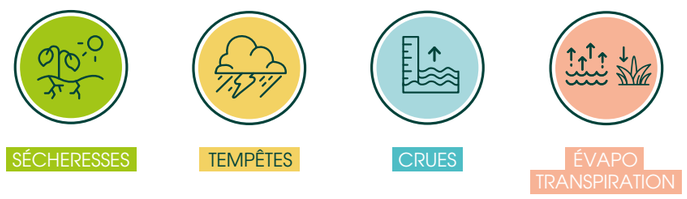
18 % des plans d'eau français

EN FONCTION DE LA PROFONDEUR ET DE LA SURFACE

Irrigation, stock d'eau potable, tourisme, baignade, pêche sportive, maintien de la biodiversité, rétention des polluants, hydroélectricité

IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

AUGMENTATION GLOBALE DE LA **TEMPÉRATURE**
+ 1,5°C
DEPUIS 1960
en Nouvelle-Aquitaine



PERTE DE SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

ACTIONS DE PRÉSERVATION ET ADAPTATION

PROMOUVOIR

une agriculture durable en limitant le flux de nutriments du bassin versant

OPTIMISER

la gestion des prélèvements d'eau

CONSERVER RESTAURER

les zones humides

COCONSTRUIRE

avec les usagers et les acteurs du territoire

1

Présentation générale des plans d'eau de Nouvelle-Aquitaine

La région Nouvelle-Aquitaine abrite, du fait notamment de son étendue, un grand nombre d'écosystèmes aquatiques. Cette multitude s'explique par les caractéristiques naturelles comme la géologie, la géomorphologie, la topographie, la pédologie ou encore la biogéographie, et par les usages et productions passés et présents des plans d'eau, les coutumes ou les choix politiques locaux, ou encore l'influence des politiques publiques portant sur ces milieux (Figure 1). Les paysages construits par les plans d'eau ont donc profondément évolué dans le temps et nous avons fait le choix, dans une optique systémique, de ne pas dissocier les plans d'eau selon leur origine, naturelle ou artificielle. Si nombre de plans d'eau naturels ont été détruits par l'Homme, ceux qui subsistent sont maintenus artificiellement en état par ces mêmes humains, rendant leur fonctionnement écologique dépendant des choix sociétaux qui leur sont appliqués. Enfin, la plupart des plans d'eau artificiels multiséculaires ont pu évoluer vers une certaine naturalité susceptible de générer des habitats d'intérêt communautaire et d'abriter une flore et une faune rares.

Lac peu profond de la Côte Atlantique avec végétation littorale, Lac de Carcans-Hourtin (33). Le plus grand lac de France en territoire métropolitain, s'est formé récemment à l'arrière des cordons dunaires atlantiques. A l'origine naturel, son fonctionnement hydrologique a été modifié par l'homme par l'installation d'écluses régulatrices du niveau d'eau. C'est aussi l'exemple typique de plan d'eau multifonction : pêche, amortisseur de crue, baignade, ... (©V. Bertrin)

Zone humide en hiver à l'arrière du Lac de Carcans-Hourtin (33), dans la zone de confluence de La Caillava avec le lac. Son fonctionnement est rythmé par les débordements, ici, de deux petits cours d'eau. Les tributaires qui alimentent le Lac de Carcans-Hourtin abritent de nombreuses zones humides servant d'épurateur naturel, de trop-plein de crue et de mosaïque d'écosystèmes diversifiés. (©F. Hoffmann)

Une lagune dans les Landes (40). Ces petits plans d'eau naturels sont très nombreux en Gironde et dans les Landes. Leur utilité est très grande en tant que réservoir d'eau pouvant soutenir les étiages, notamment en amont des bassins versants, mais également en abritant une biodiversité spécifique. Ces petites unités hydrologiques sont sensibles au comblement, aidé en cela par la présence importante d'hydrophytes. (©F. Labat)

Retenue collinaire située à Peyrière (47). Ce type de plan d'eau artificiel à l'origine, sert principalement à l'irrigation et d'appui à l'agriculture. Certaines retenues possèdent une activité récréative de type piscicole. Globalement, elles jouent également un rôle écologique en fournissant de l'eau à la faune, dans des secteurs où les pluies sont rares en été.

Chaîne d'étangs dans la Forêt des Loges dans la Haute Vienne (87). Un étang est un plan d'eau de petite taille ; ici, de nombreux étangs se succèdent en chapelet, en fond de vallée. Leur origine est souvent artificielle, l'homme réaménageant parfois des petits plans d'eau naturels préexistants. Leurs fonctions sont multiples, servant souvent de réserves piscicoles, d'appui à l'irrigation, voire d'activités de loisirs.

Lac de retenue artificielle du Saut du Loup à Miramont de Guyenne (47), photo prise depuis la retenue. Ce type de plan d'eau est très fréquent, constitué d'un barrage sur un petit cours d'eau, et composé d'enrochement, de terre ou de béton. Le trop plein s'écoule par un déversoir et rejoint le cours d'eau en aval. Ce type de plan d'eau a une vocation multiple : soutien d'étiage, irrigation, réserve piscicole, mais surtout une vocation touristique et récréative.

Plan d'eau de montagne dans les Pyrénées, dans le secteur d'Ossau (64). Ce type de plan d'eau présente un écosystème très spécifique, influencé par les conditions particulières de la montagne moyenne à haute. Notamment, l'alimentation en eau peut être plus diversifiée qu'en plaine (fusion nivale, fonte glaciaire). L'autre particularité hydrodynamique est que ce type de lac peut geler complètement en hiver. (©F. Labat)

Plan d'eau de montagne, le Lac Paradis (64). Situé dans les Pyrénées Atlantiques à une altitude 1976 mètres, ce type de plan d'origine glaciaire, est relativement fragile. En effet, les plans d'eau d'altitude peuvent être soumis à un rythme de comblement important qui tire son origine dans plusieurs facteurs : dynamique des avalanches, cônes de déjection, alluvionnement fourni par les cours de montagne mais également lié à la dynamique végétale. (©F. Prud'homme)

Figure 1 : *Planche photographique illustrant la variété de plans d´eau présents en Nouvelle-Aquitaine.*

1.1

DES RÉGIONALISATIONS DE PLANS D'EAU

Pour comprendre les particularismes de ces territoires de l'eau, il faut en rassembler toutes les informations disponibles, en commençant par leur localisation, leurs caractéristiques morphométriques, écologiques, etc., et les usages dont ils font l'objet, éléments nécessaires pour en évaluer leurs capacités d'adaptation aux évolutions climatiques.

Le tableau 1 présente les principales caractéristiques du corpus de milieux lentiques* présents en Région Nouvelle-Aquitaine et en France métropolitaine.

Département	Nombre total de plans d'eau	Superficie totale des plans d'eau (en ha)	Densité de plans d'eau (par km²)	Limnicité étendue (en %)	Proportion des différents types de plans d'eau dans le panel lentique			Proportion des superficies en eau par type de plans d'eau		
					Mares (moins de 0,1 ha)	Etangs (de 0,1 à 100 ha)	Lacs (plus de 100 ha)	Mares (moins de 0,1 ha)	Etangs (de 0,1 à 100 ha)	Lacs (plus de 100 ha)
Nouvelle-Aquitaine	119208	67064	1,41	0,79	55,7	44,3	0,03	3,7	60,2	36.3
France métropolitaine	655893	504847	1,20	0,92	58,3	41,7	0,05	2,8	56,6	40,6

Tableau 1 : *Comparaison entre les plans d'eau de Nouvelle-Aquitaine et ceux de France métropolitaine (Bartout, inédit).»*

Au regard des données de la France métropolitaine, le tableau 1 montre que le territoire régional abrite davantage de plans d'eau (PE) que la moyenne nationale avec une densité de 1,41 PE/km² contre 1,20 PE/km², mais que leur superficie moyenne y est réduite puisque la limnicité étendue* y est inférieure (0,79 % contre 0,92 %). En termes de densité, les départements des Deux-Sèvres et de la Haute-Vienne abritent 2 fois plus de plans d'eau que la moyenne régionale, alors qu'à l'inverse les Landes, et encore plus les Pyrénées-Atlantiques, en abritent 2 fois moins. Concernant la limnicité étendue, 4 départements dépassent la moyenne métropolitaine, les Landes et la Gironde grâce aux grands lacs naturels littoraux, la Corrèze par la présence de multiples lacs de barrage et la Haute-Vienne par un très grand nombre d'étangs complété de quelques barrages hydroélectriques. A l'opposé, les chiffres des 4 autres départements n'atteignent pas les 0,5 % de territoire en eau lentique : les Pyrénées-Atlantiques, la Charente-Maritime, la Charente et la Dordogne.

La figure 2 ci-après illustre cette hétérogénéité, cette dispersion sur le territoire régional. Cette distribution s'explique en partie par la nature des roches. Ainsi, les rebords ouest du Limousin et sud-est du Massif Armoricain sont représentés par des formations de socle et marqués par un réseau de drainage hydrographique très dense en lien avec des aquifères peu productifs et peu profonds, développés dans une zone d'altération de quelques dizaines de mètres au maximum. Du fait des faibles ressources en eau en période d'étiage, l'Homme a ainsi cherché à retenir l'eau par la création d'une multitude de petites retenues. Ces secteurs, où les ressources en eau sont peu abondantes, tranchent par leurs très grands nombres de plans d'eau par rapport aux zones de formations sédimentaires, que ce soit en direction du Bassin aquitain que du Bassin parisien, respectivement au sud et nord du seuil du Poitou, et en particulier sur les formations carbonatées ou bien sableuses. Ainsi, les secteurs où les formations calcaires peuvent être selon les secteurs plus ou moins altérées, fracturées voire karstifiées, comme c'est le cas dans le Périgord karstique et une partie du Poitou et des Charentes (formations jurassiques et crétacés), présentent une bien moindre densité de plan d'eau. C'est le cas également sur les formations sableuses plio-quaternaires du triangle landais.

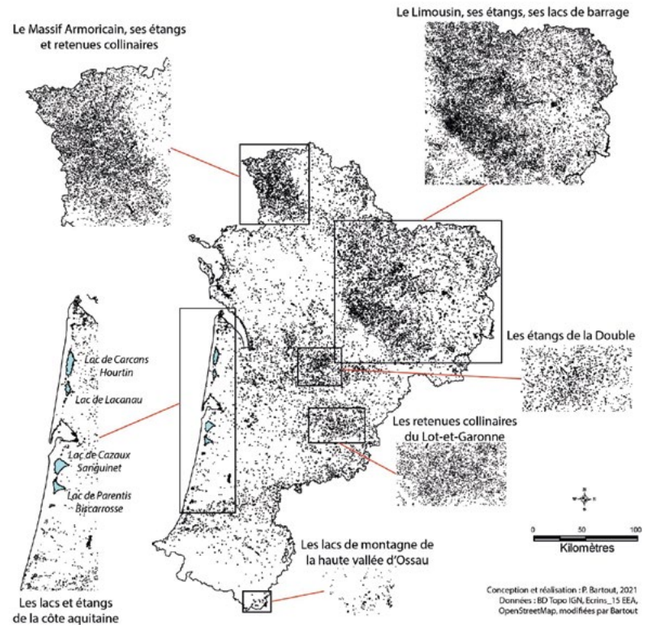


Figure 2 : *Les plans d'eau en Nouvelle-Aquitaine en 2018 (Bartout, inédit).*

1.2

DES FAMILLES DE PLANS D'EAU

Nous avons fait le choix de structurer cette présentation des plans d'eau selon la profondeur, car la verticalité est l'élément principal du fonctionnement distinct des milieux lentiques par rapport aux milieux lotiques*. La profondeur est un paramètre fondamental à prendre en compte pour dresser des bilans hydriques et hydrologiques, ce qui nous a conduits à séparer quatre familles de plans d'eau.

- **Les plans d'eau peu profonds** (moins de 2 mètres) connus dans le langage courant comme des « mares* » et des « étangs peu profonds » sont généralement des plans d'eau de dimensions réduites. Ils se trouvent dans des territoires plans (plaine sableuse des Landes, bas-plateau de la Double par exemple, d'après Marache [4]) ou de légères cuvettes karstiques de type doline abritant des mares temporaires comme sur les plateaux calcaires de Dordogne. Par leur faible volume stocké, ces plans d'eau présentent les plus faibles stratifications thermiques et les plus fortes tendances à l'échauffement, pouvant amener à des assecs* une partie de l'année. Ces plans d'eau ont constitué pendant longtemps le cœur de certaines communautés rurales grâce à leur multifonctionnalité locale (source d'eau pour la ferme, abreuvoir pour les bovins, ovins ou caprins, pataugeoire pour la volaille, réserve incendie …) ; de même, ces étangs peu profonds ont abrité une pisciculture générant d'importantes ressources financières pendant des siècles (surtout du XIIIe au XVIIIe siècles) grâce à la forte productivité de certaines espèces comme la carpe commune, *Cyprinus carpio* [5]. Du fait de leur faible profondeur, ces plans d'eau ont aussi été associés aux miasmes conduisant les campagnes hygiénistes des XVIIIe et XIXe siècles à les viser en priorité en vue de leur assèchement. Dans le plateau landais, on retrouve des *lagunes*, des petits plans d'eau (de surface inférieure à 1 ha en général) situés en tête de bassin des grands lacs côtiers, dont la recharge est aussi strictement liée au niveau de la nappe souterraine et à l'évapotranspiration. Ces milieux, bien que de petite taille, sont très nombreux localement et on estime à environ 3000 leur nombre total à l'échelle de la Nouvelle-Aquitaine [6] [7]. Aujourd'hui, ce sont des milieux souvent protégés car ils peuvent abriter une biodiversité remarquable (de nombreuses réserves ornithologiques y sont d'ailleurs associées).

- **Les plans d'eau plus profonds** (de 2 à 6-7 mètres de profondeur maximale) présentent une stratification thermique complexe, instable, et permettent à la végétation une colonisation de tout ou partie de la colonne d'eau*. Ils se retrouvent principalement dans des secteurs plus vallonnés du territoire régional. En cela, les massifs anciens que sont le Massif Armoricain au nord-ouest et le Massif Central sur la bordure est-nord-est constituent les lieux préférentiels pour cette famille de plans d'eau. Qu'ils soient présents en tête de bassin versant grâce aux eaux de ruissellement, sur des replats cristallins profitant de la présence d'alvéoles ou encore d'argiles héritées de l'ère tertiaire, ou barrant des vallons et vallées encaissés, ces plans d'eau diffèrent fortement des précédents alors même qu'ils sont nommés pour la plupart « étangs ». Ils sont installés dans des secteurs où la densité de cours d'eau est forte ; cependant, ils présentent un écoulement temporaire, du fait d'aquifères peu productifs et de la déconnexion des relations nappes-rivières en période d'étiage, soit par la perméabilité et l'épaisseur de la roche réservoir (Périgord, Charente, Quercy). Les habitants de ces territoires ont alors traditionnellement cherché à constituer des stocks d'eau en prévision de l'été, saison hydrologique souvent déficitaire [8]. Ceci concerne les levades corréziennes qui, par un subtil système de jeu avec les pentes, permettaient d'inonder des champs situés au-dessus des cours d'eau dans des vallées encaissées dès le début du printemps afin de disposer de deux récoltes d'herbe au lieu d'une seule sans cet aménagement. C'est le cas également des étangs construits en amont de moulins afin de permettre à ceux-ci d'actionner la roue à aube le plus longtemps possible et donc de subvenir aux besoins de base de toute société vivant en autarcie (farine, chanvre), mais aussi de produire des éléments industriels grâce à la hauteur de chute utilisée et la présence en abondance de bois et de minerais (forges périgourdines ou encore moulins à porcelaine du pays Arédien). Ces constructions ont été le fait de communautés rurales ou de seigneurs locaux, contrairement aux précédentes, davantage réalisées par des ordres monastiques (Double). Les fortes variations du niveau des eaux ne permettaient pas d'avoir une pisciculture performante mais l'aspect cynégétique ou encore le prélèvement de roseaux pour la vannerie étaient des activités très présentes. Aujourd'hui, ces morphométries de plans d'eau sont devenues extrêmement courantes (plus de 12 000 étangs encaissés répertoriés dans les trois départements limousins) alors même que les usages qui les supportaient ont disparu ou presque **(Figure 3)**. Cet abandon des terres est à l'origine de leur renouveau depuis une soixantaine d'années (et plus particulièrement de 1960 à la fin des années 1990) puisque la société urbaine de loisirs a pu s'emparer de ces terrains sans valeur, hérités de leurs ancêtres et dont ils ne savaient que faire, pour se construire un ilot de quiétude et de bien-être. Certaines communes ont également participé à ce mitage des campagnes pour favoriser le tourisme vert en réhabilitant de vieux étangs ou en construisant des complexes dédiés à la baignade ou à la pêche sportive [9]. Cette situation très particulière crée depuis plusieurs décennies de vives tensions entre les défenseurs des cours d'eau et ceux des étangs, avec un difficile arbitrage administratif et une quasi-absence d'études scientifiques sur ces milieux. Ces territoires accueillent cependant de magnifiques étangs pluriséculaires à la biodiversité remarquable (exemple du delta de la Vézère à l'entrée de l'étang des Oussines en Haute-Corrèze) [10].

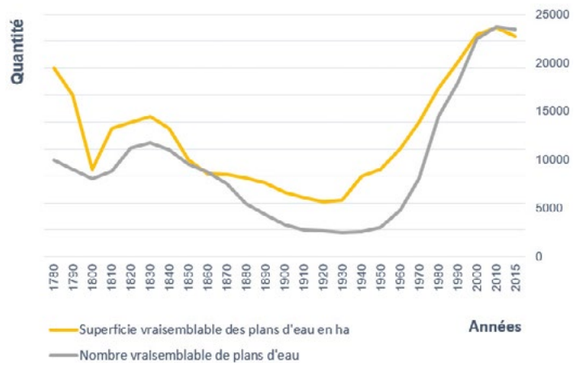


Figure 3 : *Estimation des variations en nombre et en superficie totale (en ha) des plans d'eau au cours des deux derniers siècles dans le Limousin (11).*

Depuis quelques décennies, une diversification de ces types de retenues, s'est faite par la création d'étangs voués à l'irrigation, nommés « retenues collinaires » par l'Administration française. Ces retenues visent à barrer un vallon sec (pour être déconnecté du réseau hydrographique) et constituer ainsi un stock d'eau par ruissellement ou précipitations durant la période hivernale permettant de subvenir aux besoins agricoles en période estivale. Ce type de retenues s'est multiplié principalement dans trois secteurs de Nouvelle-Aquitaine : le pays de Brive-la-Gaillarde avec les cultures arboricoles de pommiers et de noyers, les Causses du Lot-et-Garonne avec un mix d'arboriculture (pruneau par exemple) et de céréaliculture, et enfin les Deux-Sèvres pour la maïsiculture. Si dans le premier territoire ne se pose à l'heure actuelle aucune tension sur la ressource en eau, il n'en est pas de même dans les deux autres, très sensibles politiquement (voir l'encart « Des impacts cumulés : l'exemple des retenues » plus loin).

- **Les plans d'eau peu profonds mais de très grande étendue** Les lacs et étangs littoraux atlantiques comptent parmi les plus grands plans d'eau de Nouvelle-Aquitaine **(Figure 4).** Deux grands ensembles se distinguent particulièrement du Nord au Sud.
  1) L'ensemble girondin avec les lacs de Carcans-Hourtin et de Lacanau, et l'étang de Cousseau entre les deux.

  2) L'ensemble landais constitué par les lacs de Cazaux-Sanguinet et celui de Parentis-Biscarrosse. Les autres plans d'eau du littoral plus au sud (Aureilhan, Léon, Soustons, etc.), appartiennent tous aux deux précédentes familles définies.

  Tous ces plans d'eau possèdent des caractéristiques physionomiques et de mise en place communes. Ils sont peu profonds, même si leur profondeur augmente graduellement du nord vers le sud : de 2 à 3 mètres en moyenne pour les lacs de Lacanau et Carcans-Hourtin, elle passe à environ 7 mètres pour les deux lacs landais. Plus significatives, les profondeurs maximales révèlent des différences plus marquées encore : de 7 à 9 mètres pour les lacs de Lacanau et de Carcans-Hourtin, elles passent à environ 20 m pour Parentis-Biscarrosse et atteignent 23 mètres à Cazaux–Sanguinet. Néanmoins, tous ces plans d'eau présentent d'importantes zones peu profondes, avec souvent des herbiers denses de macrophytes submergés.

  Avec 5820 ha (58,2 km^2), le lac de Carcans-Hourtin est le plus étendu des quatre, suivi de très près par celui de Cazaux-Sanguinet avec 5600 ha (56 km^2). Parentis-Biscarrosse présente une superficie de 3190 ha (31,9 km2), le lac de Lacanau étant le plus petit avec 1620 ha (16,2 km^2). Aux échelles nationale et régionale, ces plans d'eau constituent potentiellement des ressources en eau de premier ordre et des milieux où de nombreux usages humains de loisirs se sont fortement développés depuis près d'un demi-siècle. Leur autre caractéristique commune tient dans leur mode de mise en place et de fonctionnement : tous résultent du barrage exercé par les cordons dunaires sableux. Ces plans d'eau fonctionnent à la fois par les apports des précipitations (autour de 900 mm par an en moyenne), de leurs bassins versants et de nappes phréatiques issues du barrage hydraulique [12]. Leurs intérêts sont également écologiques car ils abritent de nombreuses espèces de la flore et de la faune inféodées à ces milieux et forment des communautés remarquables.

- **Les plans d'eau de grande profondeur** rassemblent des lacs de montagne au sud-est des Pyrénées-Atlantiques et des barrages réservoirs, communs en Limousin et particulièrement dans le département de la Corrèze (vallée de la Dordogne et de ses affluents). Leurs profondeurs importantes contribuent à créer une zonation verticale des eaux très marquée, séparant un épilimnion d'un hypolimnion. Les lacs naturels et les barrages réservoirs sont distincts dans leur fonctionnement par deux éléments essentiels :

  1) le système de sortie d'eau ne s'effectue qu'en surface pour un lac de montagne naturel, rejetant de fait une eau réchauffée dans le cours d'eau aval, alors qu'une retenue de barrage de production hydroélectrique évacue préférentiellement ses eaux en profondeur avec des eaux plus froides mais moins bien oxygénées.

  2) l'hydrodynamique interne, puisque le premier sous-type est constitué d'une cuvette fermée (ici par un verrou dans le cas de lacs glaciaires) alors que le second barre un ou plusieurs cours d'eau et le flux longitudinal reste très marqué à l'intérieur de la retenue d'eau. En général, les barrages présenteront une stratification thermique soumise au prélèvement de l'eau de fond. Ces plans d'eau se distinguent également par leurs usages. Dans le cas des lacs de montagne non rehaussés par l'Homme, il s'agit souvent d'usages de loisir au cœur duquel se trouve le tourisme de nature.

Figure 4 : *Un exemple de plan d'eau peu profond mais de très grande étendue : le lac de Lacanau. (©V. Bertrin)*

1.3

LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Les plans d'eau font partie des eaux superficielles. En conséquence, les lacs appartiennent à l'État, à ses établissements publics, aux syndicats mixtes constitués sur le fondement de l'article L.5721-2 du code général des collectivités territoriales, aux collectivités territoriales ou à leurs groupements, et font partie du domaine public fluvial (DPF). Les différentes lois sur l'eau (1964, 1992, 2004, 2006) et la transposition des directives européennes encadrent et réglementent la gestion de l'eau afin de garantir le multiusage, la multifonctionnalité de l'eau, la préservation de la qualité de la ressource et les contrôles (police de l'eau). La Directive-Cadre sur l'Eau (DCE) du 23 octobre 2000 a imposé l'obligation de résultats en matière de mise en œuvre d'objectifs de reconquête et de préservation de la qualité des masses administratives. Les étangs et plans d'eau de statut privé ayant une surface unitaire supérieure à 1000 m^2, sont susceptibles de relever de l'une des catégories prévues par la loi et soumis par conséquent à diverses règlementations (Loi sur l'eau, sur la pêche, sur l'urbanisme, sur l'environnement). La surveillance de la qualité des lacs a pour objectif de répondre au besoin de contrôle exigé par la DCE et la réglementation française. L'entretien des étangs privés est soumis à la règlementation (respect de la sécurité et de la fréquence de vidange, d'un débit minimum de 10 % du débit moyen du cours d'eau pour les ouvrages sur cours d'eau (Code de l'environnement). Pour assurer les différents types de contrôle, un réseau de sites pérennes répartis en métropole et en outre-mer est mis en place afin d'assurer un suivi des milieux aquatiques sur le long terme, notamment pour évaluer les conséquences du changement climatique et des activités anthropiques. Les services de l'État et ses établissements publics intervenant dans les réseaux de surveillance sont la DREAL pour le suivi quantitatif (niveaux d'eau), l'OFB pour le suivi des poissons et hydromorphologique, l'Agence de l'eau pour les suivis de la qualité physico-chimique et biologique des eaux. Pour les prélèvements et analyses, cette surveillance s'appuie sur des opérateurs en régie des services de l'État (DREAL, OFB) ; des partenaires (conseils départementaux, syndicats mixtes, EPTB, parcs naturels régionaux, fédérations de pêche…). Des prestataires privés et laboratoires publics par appels d'offres, sous maîtrise d'ouvrage Agence de l'eau et OFB peuvent également être sollicités. Les données récoltées alimentent le Service d'administration national des données et référentiels sur l'eau (SANDRE).

La création d'un plan d'eau artificiel est généralement dictée par une fonction exclusive ou principale. Avec le temps, les Hommes y ajoutent d'autres fonctions, suppriment éventuellement celle initiale, ce qui en fait un milieu dynamique, en perpétuelle interaction entre la Nature et les sociétés. C'est le cas des lacs de barrage fréquemment construits pour du turbinage intensif qui se voient affectés ensuite des fonctions hydrauliques comme l'écrêtage de crue ou le soutien d'étiage, mais également des activités nautiques ou piscicoles. Cette multifonctionnalité rend leur gestion très complexe avec de nombreux conflits d'usage du fait de distinctions spatiales (logique locale vs logique du bassin versant par exemple) ou temporelles (le niveau d'eau doit être suffisamment élevé en été pour les besoins récréatifs alors que l'eau du lac devrait être soutirée pour des besoins de soutien d'étiage ou de production hydroélectrique). Ainsi, tous ces plans d'eau constituent autant de territoires limniques [11] [13], c'est-à-dire « une portion d'espace terrestre marquée par un plan d'eau notable ou plusieurs plans d'eau de différents types (lacs naturels, lacs de barrage artificiels, étangs, mares, etc.), qui influencent le milieu physique par leurs caractéristiques lentiques et sont influencés par lui, qui sont intégrés à la société et l'économie et dont les habitants se sont appropriés l'image, l'ensemble des interrelations à plusieurs échelles spatiotemporelles construisant une identité géographique », et ceci à l'échelle du plan d'eau, ce que nous nommons le limnosystème [14], ou à celle d'un ensemble pluriel de plans d'eau, la limnorégion [13].

La question des usages est consubstantielle de la question globale des plans d'eau, ceux-ci étant pour leur immense majorité nés d'une volonté humaine et, même dans le cas d'une origine naturelle du plan d'eau, les usages qui lui sont affectés déterminent la politique de gestion de celui-ci. Parmi les usages, nous pouvons d'abord opposer deux grandes catégories : les activités de support et celles de prélèvement.

Les activités de support

Elles sont des fonctions qui nécessitent la présence d'une eau dormante mais qui ne diminuent en rien la quantité d'eau présente dans la cuvette lacustre. En cela, cette famille de support est liée à la réglementation sur l'eau (Directive-Cadre sur l'Eau, DCE - 2000/60/CE) visant au « bon état » de celle-ci, car ces paramètres jouent essentiellement sur le volet « qualité » de l'eau plutôt que sur sa « quantité » (il est possible d'approfondir ce sujet en se référant au dernier rapport AcclimaTerra, au chapitre « Qualité des milieux », page 125).

Étang de Léon – Commune de Vielle-Saint-Girons (©L. Fournier)

Cette famille rassemble des usages aussi divers que la pisciculture (intensive ou extensive), les activités balnéaires (baignade, nautisme, pêche loisir…) ou la chasse, principalement sur des plans d'eau d'une certaine taille (excluant les mares). Elle ressemble aussi deux autres types d'activités que sont 1) les fonctions agricoles des petits objets limniques comme les mares de ferme, visant à l'ébattement de la volaille ou à la fonction traditionnelle de nettoyage du bétail à l'entrée du village, et 2) un usage transverse, potentiellement commun à tous les types de plans d'eau, de réservoir de biodiversité. Le pouvoir de filtration des hydrosystèmes est à l'origine de nouveaux objets lentiques que nous pourrions qualifier de réserves techniques, allant du lagunage aux bassins autoroutiers, en passant par les bassins de zones industrielles ou commerciales. Créés pour recueillir les eaux usées et les filtrer, exclus de l'image de naturalité, ils sont pourtant, comme les autres plans d'eau avant eux, en train de connaître une diversification de leurs fonctionnalités à travers l'installation de populations animales et végétales [15].

Les activités de prélèvement

Dans une optique cette fois-ci quantitative et non qualitative de l'eau, nous distinguerons les fonctions de prélèvement net de ressource en eau de celles de prélèvement avec restitution au milieu.

La première sous-catégorie est principalement constituée des usages agricoles voués à l'irrigation comme les bassines qui créent la polémique actuellement ou encore les retenues collinaires, mais nous pouvons également y adjoindre une fonction comme celle de réserve incendie. L'eau est prélevée soit au cours d'eau, soit aux nappes, par captage des eaux de pluie et barrage d'un vallon dans le premier cas, ou pompage des nappes superficielles et/ou prélèvements hivernaux dans les cours d'eau dans le second cas. L'usage de ces retenues y est unique et ce qui est gagné en productivité agricole par aspersion ou submersion des champs est perdu en matière d'infiltration (dans le cas des bassines du fait de la présence d'une membrane étanche) ou de ruissellement (dans le cas des retenues collinaires). Mais elles constituent toutes deux des réserves à l'air libre, décalant de fait le cycle hydrologique, et générant certes une évaporation accrue pendant l'été, mais aussi un accès à l'eau pour une partie de la faune alors que le cours d'eau à sec ne le permettrait plus au même moment.

Lac de Parentis-Biscarrosse – Commune de Gastes (©L. Fournier)

La seconde sous-catégorie de cet usage de prélèvement est celle restituant l'eau au milieu, c'est-à-dire que l'eau est bien soutirée au plan d'eau mais elle est restituée au cours d'eau en aval sous formes de débit réservé. Cet ensemble est davantage à mettre en lien avec l'ingénierie hydraulique autour des questions d'hydroélectricité, de soutien d'étiage et d'écrêtement de crues. De grands programmes hydrauliques ont été institués sur de nombreuses rivières de la région, le plus connu et étudié étant celui de la Haute Vallée de la Dordogne avec des barrages comme ceux de Bort-les-Orgues, Marèges, l'Aigle ou Chastang. Mais il ne faut pas imaginer que cette finalité ait été inventée au cours du XXe siècle pour répondre aux besoins des populations à l'aval des bassins hydrographiques, à la volonté d'expansion urbaine dans le lit majeur périodique des cours d'eau ou encore soutenir le développement industriel ou agricole.

En fait, cette utilité a toujours été concomitante à la création de retenues d'eau dans des secteurs encaissés dépourvus d'une ressource en eau en quantité durant la période estivale. Les nombreux moulins construits sur cours d'eau ont dû se voir adjoindre un « étang » pour leur permettre de mieux fonctionner et plus longtemps, particulièrement sur les massifs anciens, dans le cas présent dans les Deux-Sèvres et les trois départements de l'ex-région Limousin (Corrèze, Creuse, Haute-Vienne).

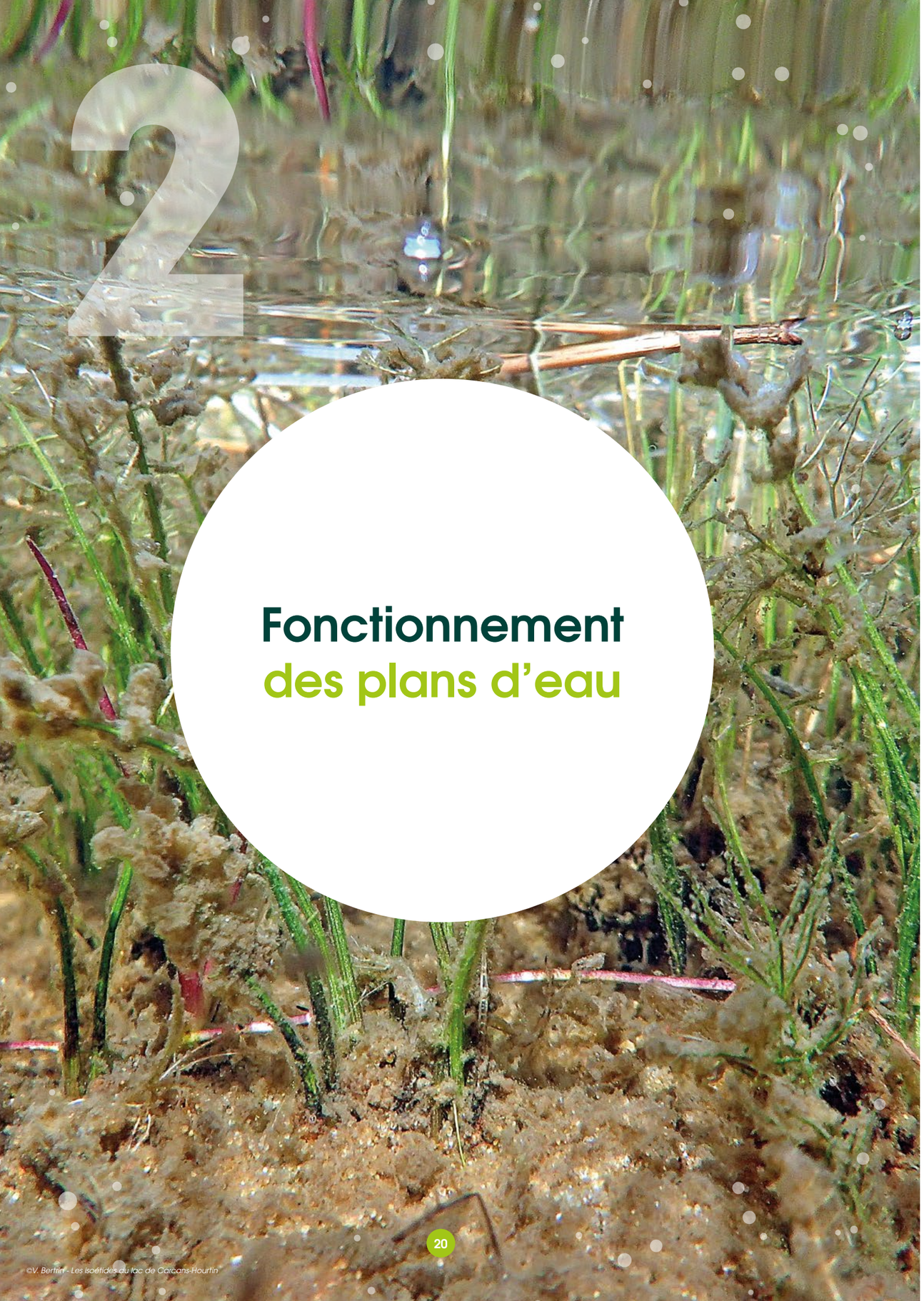
Étang de Bellebouche - Commune de Vendoeuvres (©Q. Choffel)

LES CONFLITS LIÉS À LA CONTINUITÉ ÉCOLOGIQUE ET AU DÉBIT EN RIVIÈRE

La Directive-Cadre sur l'Eau impose aux états membres d'assurer la continuité écologique de ses cours d'eau. Ce concept est lié premièrement à l'obligation d'assurer le libre transit d'amont en aval des poissons migrateurs, dont certains nécessitent de se reproduire dans les eaux froides de tête de bassin des rivières, alors que leur lieu de vie est la mer (comme les saumons et les aloses) ; d'autres ont la nécessité de rejoindre la mer pour se reproduire, alors que leur lieu de vie est la rivière (comme les anguilles). Le passage des poissons est entravé par la présence d'obstacles (seuils et barrages principalement), qui ont fait l'objet, dans la dernière décennie, d'actions de restauration d'ample envergure à l'échelle européenne. En conséquence, certains plans d'eau, situés en barrage de cours d'eau, sont critiqués car ceux-ci se situent dans le lit naturel d'un cours d'eau susceptible d'être le lieu de vie et de reproduction de migrateurs. Pour autant, notamment lorsqu'ils sont très anciens, ceux-ci ont développé un écosystème particulier générateur d'une biodiversité remarquable visible aux ceintures de végétation ou encore aux oiseaux migrateurs présents, participant au classement de nombre d'entre eux en réserve ornithologique avec observatoire à la clé. Une solution possible pour éviter de détruire le barrage et le plan d'eau associé est la mise en place de passes à poissons pour permettre le passage des migrateurs ; en Nouvelle-Aquitaine, plusieurs études sont menées pour adapter les installations aux différentes espèces de migrateurs [16] [17].

Un autre exemple de controverse autour des enjeux environnementaux de ces plans d'eau est liée à leur capacité de piégeage des sédiments, pouvant, dans certaines conditions physico-chimiques, retenir des éléments nutritifs et des polluants au sein de la fraction solide [18]. La continuité sédimentaire est effectivement le second élément structurant le concept de continuité écologique, et oblige les états membres à permettre la circulation des charges solides liées au fonctionnement normal des rivières, c'est-à-dire, le transport de sable et limon jusqu'à la mer. Pour pallier cette problématique, des actions d'arasement (abaissement partiel) ou dérasement (suppression totale) de seuil sont en cours sur plusieurs rivières de la Nouvelle-Aquitaine [19]. Si des questions subsistent à juste titre autour du comblement* ou de l'export de la matière sédimentaire, elles ne sont pas liées directement à la problématique climatique. Ce qui pourrait être exacerbé dans le futur, ce sont les conflits liés aux différents usages. Certains plans d'eau ont pu être rehaussés artificiellement de manière à remplir la fonction de stockage d'eau en vue d'une utilité hydraulique (production hydroélectrique ou alimentation des canons à neige). Cette finalité hydraulique est consubstantielle à la création des barrages-réservoirs, retenues techniques à usage unique. La gestion des eaux de la plupart de ces barrages-réservoirs a fortement évolué depuis quelques décennies pour satisfaire d'autres usages, en premier lieu le tourisme balnéaire, amenant ensuite à une régulation des débits sortants tout au long de l'année pour soutenir des besoins agricoles, industriels, urbains, voire la protection des cours d'eau aval, de leurs communautés biologiques, ainsi que de la continuité écologique. Tout ceci génère des conflits locaux portant en particulier sur les niveaux d'eau nécessaires aux différentes activités (comme le cas de la retenue de Vassivière dans les départements de la Haute-Vienne et de la Creuse, à la fois ressource hydroélectrique d'échelle régionale, principale base de loisir nautique du Limousin et source importante d'approvisionnement en eau de la centrale nucléaire de Civaux située une centaine de kilomètres en aval sur la Vienne). L'utilisation des plans d'eau de quelques dizaines d'hectares (hors retenues hydroélectriques) pour un soutien des débits et éviter les assecs, a été lancée dans la Creuse dans les zones de têtes de bassin versant. A cet égard, une opération pilote a été mise en œuvre impliquant principalement le Conseil Départemental de la Creuse, l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, l'EPTB Vienne, l'Université de Limoges (équipe PEIRENE-eau), et des propriétaires privés d'étangs. Les premiers résultats de l'étude, encore en cours, ont permis de sortir les premiers enseignements sur la possibilité d'utiliser les plans d'eau pour soutenir les étiages sévères ou éviter les assecs des cours d'eau de tête de bassin versant, et ainsi limiter les effets du changement climatique sur les milieux aquatiques et les usages humains. Les étangs candidats à l'échelle de ce département ne représentent que 5 plans d'eau sur un peu plus de 3000 étangs. Ces étangs ont été choisis en fonction de leur localisation en tête de bassin, et présentent une taille suffisante pour en utiliser l'eau pour le cours d'eau en aval, tout en conservant suffisamment d'eau dans l'étang pour ne pas en altérer l'usage. Les débits restitués au cours d'eau, même si de faible entité (10 à 50 L/s), permettent d'assurer quantitativement le principal usage du territoire, i.e. l'abreuvement des bovins à viande directement au cours d'eau. Cependant, une surveillance est mise en place par rapport à la qualité d'eau, pour qu'elle soit compatible avec la santé animale, à cause des développements de cyanobactéries constatés dans les étangs et du risque de la présence de toxines associées. De plus, en raison du fond géochimique et du passé minier dans certains secteurs, les plans d'eau locaux peuvent être soumis en période chaude à des épisodes d'anoxie* à l'interface eau-sédiment, pouvant provoquer des relargages importants d'arsenic ; ce composé représente également un risque sanitaire important pour l'alimentation en eau du bétail à partir de l'eau d'étang. Enfin, même si l'usage est préservé, il est indispensable d'aménager des aires d'abreuvement, afin d'éviter le colmatage* du cours d'eau suite au piétinement animal sur les berges. La conservation de la qualité d'eau initiale du cours d'eau (ex. évitement de la dégradation des berges, conservation de la ripisylve) est indispensable pour permettre au cours d'eau « de digérer » les dérives de qualité d'eau induites par les lâchers des eaux d'étang (ex. eau plus chaude, eau avec des teneurs en matières organiques plus fortes). Au-delà de la sauvegarde des usages par l'utilisation des réserves d'eau contenues dans les étangs, la préservation du fonctionnement biologique et des espèces est aussi à considérer dans ces zones à haut potentiel pour des espèces patrimoniales, certaines en danger de disparition.

A noter que l'étude précédemment décrite montre que l'usage des étangs de tête de bassin pour apporter de l'eau à l'aval est inopérante. En effet, seulement un petit nombre de plans d'eau seraient utilisables, car ils devraient garantir au même temps la présence d'une réserve d'eau conséquente et la préservation de la qualité des milieux aquatiques (l'étang lui-même et les milieux en aval).



©V. Bertrin - Les isoétides du lac de Carcans-Hourtin

2

Fonctionnement des plans d'eau

2.1

LES BILANS HYDRIQUE ET HYDROLOGIQUE

Les variations de stock et de niveau d'un plan d'eau s'expliquent par la dynamique des flux en entrée et en sortie **(Figure 5)**. Les affluents et les précipitations directes sur le plan d'eau constituent des apports (entrées). Les émissaires, l'évaporation depuis le plan d'eau, et l'évapotranspiration par les végétaux aquatiques constituent des pertes (sorties). Les sorties d'eau par les émissaires peuvent faire l'objet de régulations partielles, les éventuels rejets ou prélèvements anthropiques (pompages) peuvent avoir un impact majeur sur les fluctuations de niveaux du plan d'eau. Le sens des échanges entre le plan d'eau et l'aquifère (perte ou gain) dépend du niveau relatif de l'aquifère par rapport au plan d'eau. Si l'aquifère a une cote piézométrique plus basse que le plan d'eau, il constituera une perte pour le plan d'eau (infiltration vers la nappe), et un gain dans le cas contraire. Sauf contexte karstique, ces échanges avec la nappe se font de manière diffuse sur les bordures et le fond du plan d'eau et leur intensité dépend de la perméabilité des sédiments et de la présence d'une membrane pour certains plans d'eau artificiels. En général, les retenues artificielles possèdent un fond argileux ou une membrane étanche pouvant limiter voire annuler les échanges avec la nappe, mais de nombreux plans d'eau sont à l'équilibre avec la nappe. Selon Meybeck [20], les affluents ou tributaires forment les apports les plus importants dès que le quotient des superficies bassin versant/lac est supérieur à 5 ou 6, ce qui est le cas de l'immense majorité des plans d'eau. En particulier dans les parties amont des bassins versants, de nombreux plans d'eau sont alimentés par de petits cours d'eau et nombre de petites retenues s'appuient sur ce type de régime hydrique. Dans la majorité des plans d'eau de la Nouvelle-Aquitaine, l'émissaire forme la principale sortie d'eau. Ainsi, dans les petits étangs limousins barrant des cours d'eau, environ 90 % de ces sorties annuelles sont dans le cours d'eau même [21].

Le second élément engendrant une sortie d'eau rassemble l'évaporation directe de la surface des eaux et l'évapotranspiration des végétaux colonisant les bordures du plan d'eau. Certains lacs et étangs littoraux fonctionnent principalement selon ce principe mais il s'agit, selon Meybeck [20], d'une exception dans les bilans lacustres. La quantification précise de l'ensemble des termes du bilan hydrique, et spécifiquement du flux d'évaporation mérite des investigations complémentaires. Des travaux récents [22] [23] portant sur des étangs en Haut-Limousin (Nouvelle-Aquitaine) et en Brenne (Centre-Val-de-Loire) nous donnent une première estimation, pas forcément extrapolable à toute la région, des valeurs générées par ces deux phénomènes naturels. Dans un petit étang profond du bassin de la Vienne amont, la sortie d'eau par évaporation se situe autour de 850 mm.an^{-1} soit à peine plus que les précipitations directes. Dans un étang de taille moyenne et pelliculaire en Brenne, cette valeur se situe entre 900 et 1000 mm.an^{-1}. Des modélisations des bilans hydriques des lacs médocains permettent d'estimer l'évaporation également entre 900 et 1000 mm.an^{-1} [24]. L'évapotranspiration depuis les végétaux aquatiques peut être plus élevée que l'évaporation depuis la surface d'eau libre. Une étude comparative entre un étang en eau et un ancien étang effacé et remplacé par une sagne (type de tourbière) a par exemple montré que durant la période mars-octobre, l'évapotranspiration depuis la sagne était 1,37 fois plus importante que l'évaporation de l'étang [23].

Les plans d'eau ont naturellement tendance à se remplir en hiver et à voir leur niveau d'eau diminuer en été. Ils peuvent jouer un rôle de réserve hydrologique pour l'alimentation des cours d'eau au même titre que les nappes, la neige ou la glace, générant des décalages temporels et fonctionnels des écoulements dans le réseau hydrographique aval. Dans la régulation de ces écoulements qu'ils peuvent ainsi créer, les plans d'eau agissent potentiellement comme des éléments de pondération des aléas climatiques. Cette potentialité peut leur être attribuée volontairement au cours de démarches de gestion des milieux artificialisés, comme le Lac de Bordeaux, plan d'eau régulateur des eaux pluviales de la zone urbanisée qui l'environne.

Un autre exemple est constitué par le transfert des eaux du bassin de la Gartempe vers celui de la Vienne par une succession organisée de plans d'eau artificiels et d'étangs destinés à l'alimentation en eau potable de l'agglomération limougeaude. Sur le littoral médocain, les lacs et leurs zones humides sont identifiés dans le règlement d'eau de ce territoire comme les principales zones d'expansion des crues permettant la prévention des inondations, avec des capacités de l'ordre de 50 millions m^3 de stockage possible. D'ailleurs, la quantification de la contribution des plans d'eau sur le soutien d'étiage à l'échelle d'un bassin versant mériterait des investigations complémentaires. En effet, sur de longues échelles temporelles, une extension du plan d'eau stable, révèle un équilibre pluriannuel du bilan hydrique. A l'inverse, la disparition de certains plans d'eau révèle un déséquilibre à la faveur des sorties (évaporation, infiltration vers la nappe, ...), phénomène qui pourrait se généraliser dans le contexte du changement climatique.

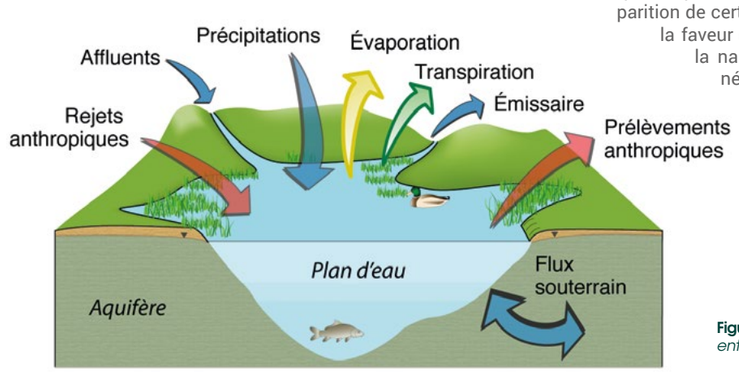


Figure 5 : *Représentation simplifiée des flux en entrée et sortie dans un plan d'eau de type « lac ».*

2.2

LES COMMUNAUTÉS BIOLOGIQUES ET LEUR RÔLE FONCTIONNEL

Les milieux aquatiques d'eau douce sont des écosystèmes possédant une biodiversité exceptionnelle, mais aussi la plus menacée à l'échelle de la planète, notamment par le changement climatique [25] [26] [27]. En Nouvelle-Aquitaine, les communautés biologiques lacustres présentent une grande hétérogénéité liée à la diversité des environnements/biotopes* présents, depuis les lacs de haute montagne, naturellement oligotrophes* et apiscicoles, jusqu'aux lacs et étangs de la plaine sableuse du plateau landais en passant par les lacs et retenues de moyenne montagne du Limousin. De cette hétérogénéité naît une spécificité importante des milieux aquatiques néo-aquitains qui hébergent une diversité exceptionnelle, propre à la région. Par exemple, les grands lacs de la frange littorale sont historiquement des systèmes peu profonds sur substrats sableux, relativement pauvres en nutriments (oligo-mésotrophes) [28]. Ils hébergent ainsi des communautés végétales originales, nommées isoétides, formant des gazons ras amphibies de petite taille [29] [30]. Les isoétides regroupent la Lobélie de Dortmann (*Lobelia dortmanna*, dont les grands lacs aquitains représentent la limite méridionale de leur distribution en Europe), la Littorelle à une fleur (*Littorella uniflora*) et l'Isoète de Bory (*Isoetes boryana*) endémique à ces lacs. *Isoetes lacustris* est présente dans les lacs de montagne aquitains **(Figure 6)**.

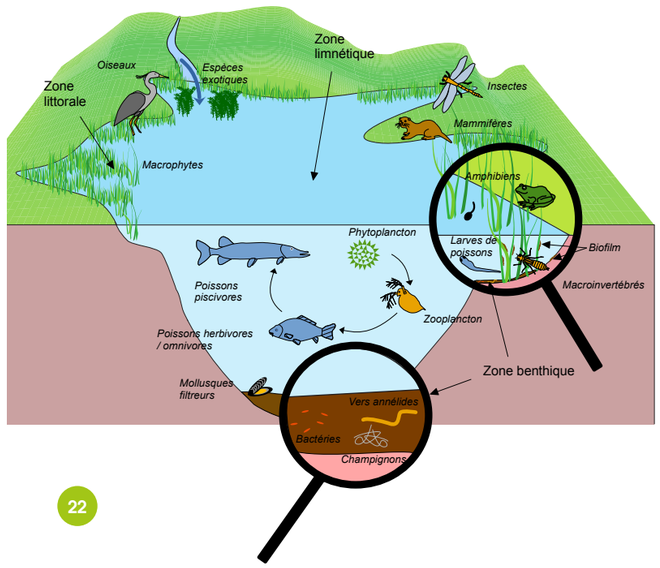
Des espèces rares de micro-algues (comme *Mallomonas adamas*) ont aussi été identifiées dans les lacs aquitains, considérés comme de véritables 'hotspots' de biodiversité pour certains groupes taxonomiques [31] [32]. En Nouvelle-Aquitaine, une espèce de Brochet endémique de la région (*Esox aquitanicus*) a aussi récemment été décrite [33]. Les conditions extrêmes des lacs Pyrénéens, induites par un climat de haute altitude et une alimentation en eau généralement issue de la fonte des neiges, entrainent une forte spécialisation des communautés dans ces lacs froids et oligotrophes et obscurcis par la neige et la glace en hiver. Les espèces végétales qui composent ces communautés sont des plantes habituelles des hautes latitudes (espèces boréo-alpines ou circumboréales comme le Potamot des Alpes, *Potamogeton alpinus*, ou le Potamot à feuilles de graminées, *P. gramineus*), qui trouvent dans les Pyrénées un refuge d'altitude [34] **(Figure 7)**.

Pour la plupart des familles de lacs définis précédemment, la biodiversité se répartit généralement entre trois zones fortement interconnectées [35] : une zone littorale de faible profondeur, une zone pélagique (ou zone limnétique) représentant la zone en eau libre profonde et une zone benthique profonde associée aux sédiments recouvrant le fond du plan d'eau **(Figure 8)**. La zone pélagique est le biotope (i.e. le milieu de vie) principal de la faune piscicole, du phyto- et du zooplancton, alors que la zone littorale est le biotope préférentiel des plantes aquatiques visibles à l'œil nu (macrophytes), des microorganismes colonisant les substrats immergés (phytobenthos et microméiofaune, composants principaux du biofilm), des macroinvertébrés, des larves de poissons ainsi que des oiseaux et des amphibiens. La zone littorale est reconnue comme concentrant l'essentiel de la biodiversité sur les grands lacs et les lacs de montagne [36] [37]. La zone benthique regroupe en grande majorité des invertébrés et des microorganismes (bactéries et champignons) et est le siège de nombreux processus biogéochimiques.

Figure 6 a et b : *Espèces patrimoniales appartenant à la communauté végétale des isoétides. a) gazon amphibie composé par* Lobelia dortmanna, Littorella uniflora *et* Isoetes boryana *(©V. Bertrin) ; b) individu de* Isoetes lacustris *(©F. Prud'homme)*

Figure 7 : *Herbier submergé mixte composé par* Potamogeton gramineus *et* Elodea canadensis *dans un lac des Pyrénées. (©F. Prud'homme)*

Figure 8 : *Représentation schématique des différentes zones écologiques d'un plan d'eau et de la biodiversité associée.*



Les communautés biologiques jouent un rôle essentiel au niveau du recyclage des nutriments des plans d'eau, essentiellement via la respiration microbienne et via la production primaire végétale [38] [39]. Au-delà de la diffusion de l'oxygène de l'atmosphère vers le lac, c'est la photosynthèse aquatique qui recharge les concentrations en oxygène dans l'eau, molécule nécessaire pour la respiration de la grande majorité des organismes vivants dans l'eau et dans le sédiment. Grâce à leur activité photosynthétique, les végétaux aquatiques (ou producteurs primaires) sont capables de fixer les éléments inorganiques (carbone, azote et phosphore, et d'autres microéléments essentiels comme la silice et le potassium) dans le tissu végétal [40] [41]. Par la suite, les producteurs secondaires (bactéries, invertébrés et poissons) pourront se nourrir de cette matière organique déjà élaborée pour synthétiser l'énergie et les molécules nécessaires à leur métabolisme [42].

Le phytoplancton, constitué par des algues microscopiques flottant librement dans l'eau, agit sur les cycles biogéochimiques majeurs, tels que ceux du carbone, de l'azote, du phosphore et de la silice. Les changements dans la structure de la communauté phytoplanctonique, résultant des sensibilités environnementales différentes des groupes fonctionnels (regroupement de traits biologiques particuliers), peuvent modifier considérablement le cycle élémentaire à l'échelle locale [43]. En Nouvelle-Aquitaine, plusieurs études sur les lacs littoraux ont montré la présence de groupes fonctionnels distincts en fonction de l'enrichissement du milieu, ainsi que la prolifération de cyanobactéries dans certains sites [28] [45] [46] [47]. Certaines cyanobactéries ont la capacité d'utiliser l'azote atmosphérique à la place de l'azote minéral présent dans l'eau. La présence de ces cyanobactéries, fixatrices d'azote, engendre de nombreuses conséquences biogéochimiques, car elle détermine la quantité de "nouvel" azote ajouté au milieu aquatique, qui peut être ensuite recyclé par d'autres microbes et producteurs primaires. C'est ainsi que, par exemple, l'abondance de cyanobactéries dans le lac de Parentis-Biscarrosse pourrait expliquer le développement massif de macrophytes submergés, plus que dans les autres grands plans d'eau du littoral aquitain.

Plus généralement, les macrophytes colonisent les zones littorales et les sédiments lacustres peu profonds. Les recherches récentes montrent que les gazons amphibies formés par les isoétides ont un rôle clé dans le fonctionnement biogéochimique de l'écosystème lacustre [48] [49] [30]. En effet, elles sont capables de transférer une grande partie de l'oxygène produit par les feuilles dans le sédiment via les racines. Cette oxygénation soutient des populations bactériennes méthanotrophes qui consomment le méthane produit dans les couches profondes du sédiment, et réduisent par cette voie les émissions de gaz à effet de serre des lacs. Grâce à l'oxygénation du sédiment par les racines, la rétention de l'azote est aussi possible par dénitrification, processus bactérien qui se déroule à côté des racines des plantes, et qui libère l'eau de la charge azotée [50]. Récemment, Benelli *et al.* [51] ont montré qu'une espèce de macrophyte exotique, *Sagittaria graminea*, participait également à cette action épurative [51]. Les grands herbiers invasifs des lacs aquitains, formés principalement par *Egeria densa* et *Lagarosiphon major*, soutiennent des populations bactériennes épiphytes (colonisant les tiges et les feuilles des plantes). Des études récentes ont montré d'importants rejets de carbone (sous-forme de dioxyde de carbone, CO_2, et méthane, CH_4) à l'interface sédiment-eau, alimentés par la dégradation de la biomasse en décomposition. Cependant, la diffusion lente de ces composés dans la colonne d'eau permet aux bactéries aérobies épiphytes d'oxyder une grande partie du CH_4 produit dans le sédiment. De plus, le processus de fixation de carbone par photosynthèse des macrophytes contribue à assimiler la quasi-totalité du CO_2 rejeté par la respiration bactérienne sédimentaire. De cette manière, à l'échelle du plan d'eau, les herbiers denses de macrophytes sont capables d'immobiliser de grandes quantités de nutriments, agissant ainsi sur les fonctions d'épuration du lac. Par exemple, il a été estimé que dans les grands lacs peu profonds de la façade atlantique aquitaine, à l'échelle annuelle, les herbiers de macrophytes exotiques arrivaient à stocker des milliers de tonnes de carbone et des centaines de tonnes d'azote et de phosphore [52] [53].

L'action positive d'épuration par les producteurs primaires enracinés peut être modifiée (de manière positive ou négative) par les macroinvertébrés benthiques présents dans le sédiment. Les études existantes concernant deux espèces exotiques, l'oligochète *Sparganophilus tamesis* **(Figure 9)** et le bivalve *Corbicula fluminea*, indiquent que leur présence excessive pourrait avoir des effets néfastes sur cette fonction d'épuration [54] [55] [56], mais la question du rôle des producteurs secondaires dans le fonctionnement lacustre en région Nouvelle-Aquitaine reste à creuser. En outre, le rôle des producteurs primaires vis-à-vis des cycles biogéochimiques dans des contextes fortement impactés par le changement climatique, comme les étangs peu profonds ou les milieux temporaires reste à étudier. Il est aussi nécessaire de mieux connaître l'impact des espèces animales exotiques vis-à-vis de la structuration des réseaux trophiques, ce qui pourrait avoir des répercussions significatives sur les cycles des nutriments et de la matière organique.

Figure 9 a et b : *a) Individu de* Sparganophilus tamesis *; b) galerie creusée par l'oligochète dans le sédiment sableux. (©M. Bartoli)*

2.3

L'EUTROPHISATION ET LE LIEN AVEC LE BASSIN VERSANT

L'eutrophisation peut être définie comme un enrichissement en azote (N) et phosphore (P) naturel ou anthropique ayant pour conséquence un accroissement des processus de production primaire et de respiration, résultant notamment une baisse de l'oxygénation dans le plan d'eau [57] [58] [59 [60] [61] [42]. Il est nécessaire de rappeler qu'il existe deux types d'eutrophisation pouvant agir de façon concomitante sur un plan d'eau : une eutrophisation naturelle ou géologique qui résulte en « une augmentation de la production de matières organiques et minérales qui accompagne l'évolution d'un écosystème aquatique sur des temps géologiques jusqu'à son éventuel comblement » et une eutrophisation anthropique définie par « une surproduction de matières organiques induite par des apports anthropiques en phosphore et en azote» (définitions données dans l'expertise collective ESCO [62]). L'eutrophisation naturelle intervient sur des temps longs (de l'ordre des siècles), alors que l'eutrophisation d'origine anthropique peut survenir en peu d'années. L'eutrophisation d'origine anthropique est la première cause du dysfonctionnement des plans d'eau, et est due aux apports de nutriments du bassin versant (ruissellement, tributaires) associés, pour certains plans d'eau du sud de Nouvelle-Aquitaine. Premièrement, l'arrivée d'un surplus de nutriments dissous peut favoriser une croissance excessive de phytoplancton ; cette croissance aura comme première conséquence la diminution de la transparence de l'eau. Si ce phénomène perdure dans le temps ou augmente en fréquence, la turbidité de l'eau pourrait empêcher les plantes aquatiques, qui se développent principalement sur le fond, de recevoir suffisamment de lumière pour réaliser la photosynthèse. La disparition progressive de la végétation submergée aurait à son tour une répercussion sur la diminution de l'oxygénation de l'eau et des sédiments, favorisant ainsi un relargage des nutriments au sein du plan d'eau. Ce processus peut donc engendrer une boucle dans le système de régénération et de consommation des nutriments, ayant comme résultat principal des eaux très troubles, dépourvues d'oxygène et inhospitalières pour les organismes aquatiques. Une fois un plan d'eau eutrophisé, il sera très difficile de le reporter à son état de trophie initial ; ce processus est bien expliqué par Scheffer [63] et pourrait être exacerbé par le changement climatique. En effet, des températures plus élevées pourraient contribuer à stimuler à la fois la production primaire phytoplanctonique et la respiration bactérienne, ce qui pourrait engendrer des conditions favorables à l'eutrophisation.

Les plans d'eau peuvent être considérés comme des filtres naturels à l'interface entre les bassins versants et le milieu marin, car ils retiennent et éliminent une partie des nutriments et des polluants qu'ils reçoivent de l'amont [64] [65]. Ce rôle de filtre est bien connu et décrit par Cole *et al.* [66] par le modèle de « tuyau actif » (active pipe). Pour comprendre si un plan d'eau assure sa fonction de filtre de manière efficace, le modèle considère tous les apports possibles de composés chimiques au système (pluie, eaux de lessivage, infiltration par la nappe superficielle, rejets anthropiques), puis les compare avec les exports (flux vers l'exutoire, échanges avec l'atmosphère) **(Figure 10)**. Certains auteurs soulignent l'importance d'étudier aussi les processus biogéochimiques locaux et ceux des systèmes environnants les plans d'eau, tels que la capacité de stockage des nutriments dans le sédiment, ainsi que les taux et les types de productions primaires et secondaires présents [67].

La source de nutriments des plans d'eau provient à la fois de l'apport du bassin versant et du recyclage interne [38] [39]. La dynamique des nutriments dans le bassin versant est régie par plusieurs facteurs, incluant la taille des bassins versants, l'occupation des sols, le relief et le climat. Les flux de nutriments ont été étudiés dans plusieurs bassins versants de lacs de la Nouvelle-Aquitaine. Le bassin versant du réservoir hydroélectrique de Bort-Les-Orgues situé sur la Dordogne apportait annuellement près de 120 tonnes de phosphore à la retenue à la fin des années 1990 [68], dont 80 % étaient issus de l'élevage et de l'agriculture. Dans un tel système anthropisé (plan d'eau artificiel géré par des vannes, bassin versant agricole), des mesures de gestion simples ont des effets bien plus immédiats que les effets du changement climatique.

Les bassins versants des grands lacs côtiers du Médoc et des Landes présentent un substrat sableux dont le potentiel agronomique naturel n'est pas très important [69]. Le potentiel agronomique augmente sensiblement pour peu que l'on draine l'excédent d'eau et qu'on y apporte des engrais. Cela explique que ces bassins versants soient composés de très nombreux fossés (appelés *crastes* ou *barades*) qui font office de drains et qui vont canaliser les eaux vers les principaux ruisseaux et les plans d'eau, spécialement en automne, quand le lessivage du sol est plus important [12] [70]. Les principaux flux d'azote vers les lacs se concentrent donc sur une période très courte de l'année hydrologique, environ un mois, à partir de la remise en eau. Pendant cette période, il a été envisagé de ralentir au maximum les flux d'eau entrant dans le lac afin que ces derniers puissent recycler l'azote partiellement. Il existe plusieurs techniques pour cela : l'utilisation de batardeaux, obstacles qui ralentissent la circulation de l'eau, ou le stockage dans des zones humides artificielles [71].

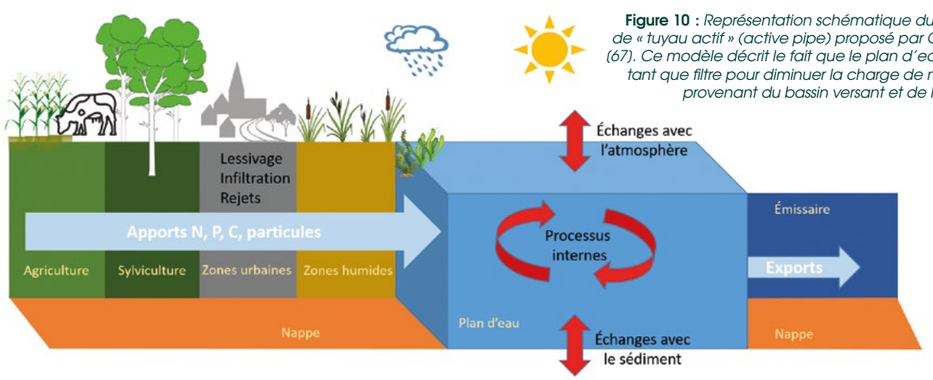


Figure 10 : *Représentation schématique du concept de « tuyau actif » (active pipe) proposé par Cole et al. (67). Ce modèle décrit le fait que le plan d'eau agit en tant que filtre pour diminuer la charge de nutriments provenant du bassin versant et de la nappe.*

Un bilan complet des entrées et des sorties des nutriments a été réalisé pour les grands lacs côtiers médocains [24]. Ce bilan a montré que les lacs de Carcans-Hourtin et de Lacanau jouaient un rôle de tampon dans le *continuum* bassin versant-lac-Bassin d'Arcachon, puisqu'ils retenaient plus de 60 % des nutriments sous forme de particules organiques et minérales stockées dans le sédiment. Le lac de Parentis-Biscarrosse plus profond que les lacs médocains, est actuellement eutrophe* [28] et forme une masse d'eau* profonde qui devient anoxique* en été. Ce lac est un bon exemple de lac stratifié où les flux benthiques d'azote et de phosphore vers la colonne d'eau sont amplifiés en été en raison de l'anoxie [72]. Il pourrait représenter un analogue de ce que pourraient devenir les lacs médocains dans un contexte climatique plus favorable au maintien d'une stratification thermique et à une production primaire plus intense ; ce qui contribuerait à limiter leur rôle de filtre des nutriments provenant du bassin versant.

Les plans d'eau de Nouvelle-Aquitaine ne sont pas tous au même stade de leur cycle d'eutrophisation (naturelle et anthropique) du fait de leur origine, de leur âge et de la taille de leur bassin versant. Ils possèdent un héritage sédimentaire différent venant de leur bassin versant respectif (apport de nutriments, de matière). De plus, sur certains bassins versants les pressions anthropiques ont diminué au cours de ces quinze dernières années : on assiste à une baisse des surplus azotés venant de l'agriculture et des rejets domestiques [73]. Les plans d'eau d'altitude des Pyrénées sont dans l'ensemble moins avancés dans leur processus d'eutrophisation et sont moins chargés en nutriments. Inversement, les plans d'eau humifiés (« polyhumiques » ou « dystrophes ») sont plus riches en nutriments et se caractérisent par des eaux colorées et une quantité importante de matières organiques dans les sédiments, à ratio de carbone sur azote (C:N) élevé. Ces sédiments, souvent accompagnés de la formation de tourbe, tendent à diminuer la productivité du plan d'eau [74]. Ce phénomène est favorisé par plusieurs facteurs : (i) les matières organiques allochtones*, riches en cellulose et en lignine, sont difficilement dégradées [75], (ii) l'acidité de l'eau, liée à l'hydrogéologie du plan d'eau [76] et (iii) des températures froides et des niveaux d'eau plutôt constants soutenus par des précipitations abondantes, qui limitent la dégradation des matières organiques. Ces plans d'eau humifiés sont ainsi très fréquents en Nouvelle-Aquitaine dans le massif landais en raison de l'acidité des sols. On trouve également des plans d'eau à C:N élevés dans les Pyrénées, lorsque l'hydrologie est assez stable pour permettre la formation de tourbe. Mais les eaux y sont généralement transparentes en raison notamment de temps de résidence faibles. L'impact du dérèglement climatique sur la dynamique d'humification en Nouvelle-Aquitaine est difficile à prédire, d'autant qu'elle est très peu étudiée en France. Certains facteurs d'humification devraient être favorisés (quantité d'apports allochtones, acidification des eaux [77]), d'autres défavorisés (stabilité hydrologique, températures froides), ce qui est susceptible de créer des réponses très contrastées en fonction notamment de l'altitude [78]. Le changement climatique n'aura donc pas le même effet sur la dynamique de chacun des plans d'eau du territoire de Nouvelle-Aquitaine. En effet, les systèmes oligotrophes seront plus sensibles à l'action conjointe d'un relargage de nutriments et de l'augmentation des températures. Dans ce contexte, on perçoit l'intérêt de toute mesure visant à réduire dès l'amont les flux de nutriments, et en particulier les nutriments dissous (nitrates et phosphates) arrivant en excès.

LE RISQUE DE COMBLEMENT ET SA GESTION

Pour diminuer les apports excessifs de matériel sableux du bassin versant, qui pourraient combler rapidement les petits étangs, en amont immédiat de la plupart des étangs arrière littoraux landais, des bassins dessableurs ont été aménagés au niveau des principaux tributaires. Ces bassins visent à limiter le comblement de ces étangs en retenant les matières solides, essentiellement le sable mais aussi une petite fraction des matières organiques, charriées par les cours d'eau. Ainsi, dans les Landes, 16 bassins dessableurs sont régulièrement entretenus par le Syndicat Mixte Géolandes en amont des plans d'eau suivants : Cazaux-Sanguinet, Parentis-Biscarrosse, Aureilhan, Léon, Moïsan, Soustons, Blanc, Turc, Garros. Ces opérations d'entretien sont déclenchées en fonction des apports de sédiments observés, soit en général tous les 1 à 3 ans selon les bassins. Elles représentent un volume total de près de 15 000 m³ par an permettant de sauvegarder chaque année une superficie en eau d'environ 1,8 ha, tous plans d'eau confondus. Dans un contexte pédologique de substrat sableux peu cohésif, la modification du régime des précipitations et en particulier l'augmentation des épisodes d'intense pluviométrie pourraient impacter sensiblement la dynamique de transport sédimentaire dans les bassins versants et ainsi accélérer le comblement des plans d'eau.

Le recreusement de tout ou partie d'un plan d'eau en voie de comblement avancé est aussi une action envisageable pour lutter contre le comblement et préserver des surfaces en eau. Géolandes a ainsi conduit plusieurs opérations de désenvasement, de curage ou dragage, dans les plans d'eau arrière littoraux landais ayant permis d'extraire un volume total s'élevant à 650 000 m³ de sédiments : Moïsan (en 1990-1991), Léon (en 1991-1992 puis 2015), retenue des Forges (en 1992), Pinsolle (en 1993), Aureilhan (en 2006-2007). Le recreusement favorise les écoulements vers l'exutoire et la circulation des eaux dans le plan d'eau. Les conditions sont alors plus favorables au développement de plantes immergées par un meilleur accès à la lumière [79]. Il est à noter que les travaux réalisés sur l'étang de Moïsan ont tout simplement permis de sauvegarder ce plan d'eau en restaurant une lame d'eau d'1,50 m sur la totalité de sa superficie, alors qu'elle n'était plus que de 20 à 30 cm en période estivale.

Les étangs littoraux médocains et landais accumulent des vases dans les parties les plus profondes ; ces vases organiques s'accumulent à partir d'une profondeur de 5 m, en raison du manque d'agitation du fond par les vagues. Le volume stocké de vases organiques a été récemment estimé pour le lac de Carcans-Hourtin à 24 millions de m³ et pour Lacanau à 3 millions de m³ [24]. Sur les retenues, des actions de vidange partielle ou complète sont possibles pour évacuer une partie des nutriments de la masse d'eau (soutirage de surface ou de fond) ou bien des sédiments eux-mêmes. Le soutirage par le fond retire du système des eaux profondes désoxygénées et souvent chargées en nutriments. En baissant la charge nutritive, cela contribue à diminuer le niveau trophique de la retenue et à réduire le développement des cyanobactéries. Des questions se posent néanmoins sur le devenir des eaux ou sédiments soutirés. En général, toute modification des flux de nutriments et matériaux solides issus du bassin versant liée au changement des températures, des régimes de précipitation ou des pratiques agricoles, aurait un impact sur les échéances de comblement des lacs.

2.4

LE RÉGIME DES VENTS, L'HYDRODYNAMIQUE ET LA STRATIFICATION DES EAUX

Par définition, les lacs sont caractérisés par une profondeur importante et par la présence d'une stratification qui peut intervenir à une ou plusieurs périodes pendant l'année. Cette stratification consiste en des différences considérables entre la température mesurée à la surface et celle mesurée au fond de la colonne d'eau. Ce gradient de température est lié aux caractéristiques physico-chimiques de l'eau, qui augmente en densité lorsque sa température descend (jusqu'à un maximum de densité atteint en correspondance des 4 °C). Lors d'un épisode de stratification, la couche d'eau profonde, plus dense et donc plus lourde, aura tendance à rester sur le fond ; on observera ainsi une « immobilité » de la colonne d'eau, qui a des répercussions sur la chimie de l'eau. En particulier, pendant l'été, les épisodes de stratification déterminent l'épuisement de l'oxygène dissous dans les eaux de fond, les rendant ainsi anoxiques, phénomène qui empêche la vie de la plupart des organismes aquatiques et favorise le relargage de nutriments. En Nouvelle-Aquitaine, les grands lacs côtiers présentent des profondeurs compatibles avec les épisodes de stratification. La colonne d'eau des lacs landais est homogène une partie de l'année, mais une stratification thermique se met en place au printemps quand les eaux de surface se réchauffent plus rapidement que les eaux de fond [80] [72]. En été, la différence de température entre la surface et le fond des lacs côtiers est comprise entre 6 et 9 °C, et des gradients même plus élevés ont été mesurés dans d'autres lacs de moindre superficie [21].

Le climat de la Nouvelle-Aquitaine est largement déterminé par l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande. Il est également soumis aux régimes de courants complexes, de vagues et de houle provenant de l'océan Atlantique [81]. Les courants lacustres d'intensité variable interviennent dans la stratification des plans d'eau et jouent un rôle déterminant dans la dynamique et la structure des communautés biologiques au large et sur les bordures des lacs. À titre d'exemple, d'après le diagramme d'action des vagues proposé par Norrman [82], un vent de 6 m.s^{-1} (soit 22 km.h^{-1} correspondant à la force 3 de l'échelle de Beaufort), parcourant un fetch* de 8 km, génère des vagues d'environ 35 cm capables de mobiliser des particules de 0,5 mm (sables fins à grossiers) jusqu'à 3 m de profondeur. À proximité de la façade Atlantique, les vents dominants sont majoritairement d'ouest et d'ouest-nord-ouest, mais aussi fréquemment de nord-est durant l'été [83]. Les données relativement récentes (de 2006 à 2017) fournies par Météo-France pour les stations du Cap-Ferret et de Biscarrosse, indiquent que les vents soufflent avec une vitesse allant de 6 à 10 m.s^{-1} en moyenne, avec des vitesses moyennes horaires maximales dépassant parfois 28 m.s^{-1} (environ 100 km.h^{-1}) [84] [85] [86]. La vitesse et la direction du vent, associées à la profondeur et au fetch, sont des facteurs déterminants dans le fonctionnement des plans d'eau [87] **(Figure 11)**. Ces variables conditionnent le développement potentiel de vagues dans les lacs et indirectement le brassage de la colonne d'eau, ainsi que la rupture de la stratification thermique [88]. Si l'on s'appuie sur les typologies classiques de Hutchinson, puis de Lewis, les plans d'eau de Nouvelle-Aquitaine ont la possibilité d'être brassés sur toute leur tranche d'eau, depuis la surface jusqu'au fond (lacs *holomictiques*), mais selon des rythmes temporels qui diffèrent en fonction de leurs dimensions. Pour les lacs les plus profonds, ceux de montagne peuvent être *dimictiques* (brassages en automne et au printemps, stratification en été et en hiver). Concernant ceux de plaine, la douceur des hivers néo-aquitains ne permet pas leur stratification inverse en hiver, qui devient alors la saison de brassage (lacs *monomictiques* chauds). Pour les plans d'eau moins profonds, voire pelliculaires, la stratification est plus fragile, moins durable. Ils sont brassés plus fréquemment que saisonnièrement : ce sont des lacs *polymictiques*.

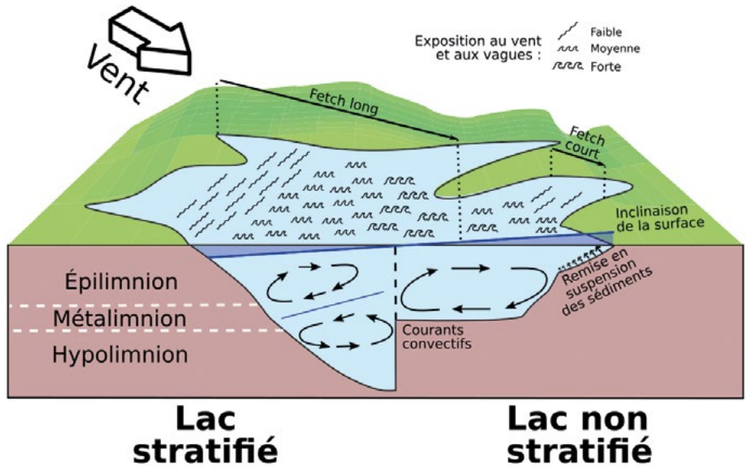


Figure 11 : *Représentation simplifiée de la stratification des eaux et de l'hydrodynamique (vagues et courants) dans un plan d'eau de type « lac ».*

Outre l'hydrodynamisme naturel, celui artificiel peut interagir avec la stratification lacustre, en favorisant ou en interrompant la mise en place de gradients de température le long d'un transect de profondeur. Quelques cas représentatifs peuvent être pris. Dans deux lacs de barrage de la Haute Charente, d'une vingtaine de mètres de profondeur maximale, la stratification thermique estivale et les brassages en saison froide forment des lacs monomictiques chauds en fonctionnement naturel. Pour lutter contre les effets de la stratification et le développement des cyanobactéries, le Conseil Général de la Charente a équipé le Mas Chaban d'un déstratificateur thermique à injection d'air [89]. Dans les étangs relativement profonds du Limousin, la stratification peut durer pendant plusieurs semaines d'affilée [21] [90] [92]. Pour les plans d'eau peu profonds, les faibles profondeurs couplées au vent et à des amplitudes thermiques journalières suffisantes

©V. Bertrin - Lac de Carcans-Hourtin

empêchent l'établissement d'une stratification durable [93]. Les lacs polymictiques connaissent des épisodes de stratification thermique estivale instable et facilement détruite par le vent. Les lacs côtiers médocains entrent dans cette catégorie. En effet, dans les lacs médocains, le gradient de densité lié au gradient de température stabilise la colonne d'eau et isole les niveaux profonds de la surface sur des périodes de quelques jours au printemps et en été [24]. Les épisodes de stratification s'interrompent brutalement lorsque les vents dépassent un seuil qui permet le mélange des eaux. La Nouvelle-Aquitaine a la particularité de compter d'importantes séries de données de températures de l'eau, ayant peu d'équivalents ailleurs sur le territoire national. Par exemple, depuis 1997, des thermomètres enregistrent au pas de temps horaire dans plusieurs étangs limousins, représentant environ deux millions de données. Ces suivis de températures montrent que les différences de gestion des plans d'eau (sortie d'eau en déversoir, moine hydraulique*, dérivation, rythme des vidanges, etc.) impactent les températures de l'eau dans des proportions nettement plus fortes que le changement climatique [21].

La formation et la progression des vagues formées au milieu vers les rives des plans d'eau sont des phénomènes complexes à décrire. De façon très simplifiée, plus les rives seront exposées à de longs fetchs en direction des vents dominants, plus elles seront soumises à l'action des vagues [94]. Les vagues génèrent des mouvements orbitaux dans l'eau, prenant la forme de courants oscillatoires dirigés vers le fond, et influencent le fonctionnement lacustre. Par exemple, dans les lacs de Lacanau et de Parentis-Biscarrosse, les épisodes d'anoxie sont significativement plus faibles dans les zones exposées au vent et aux vagues, car le brassage favorise la dissolution de l'oxygène de l'atmosphère vers l'eau [44] [86]. De plus, l'amplitude des oscillations jour/nuit de la concentration en oxygène varie entre les zones abritées du vent et les zones exposées. À l'abri du vent, les oscillations de l'oxygène sont plus étendues par rapport à celles observées dans les zones exposées. Ces deux zones, soumises à une force et à une fréquence de vents contrastées, subissent un brassage de l'eau différent au niveau local [84]. En dépit du développement d'herbiers denses de macrophytes submergés dans ces deux plans d'eau, la libération d'oxygène par la photosynthèse, couplée au brassage de l'eau, est suffisante pour maintenir de très bonnes conditions d'oxygénation. Au même temps, le déficit d'oxygène peut également avoir lieu dans les zones où les plantes sont absentes, à l'abri du vent, soutenant l'hypothèse du rôle très important des compartiments planctonique et bactérien dans la dynamique de l'oxygène au niveau de ces stations [44] [86].

L'exposition au vent et aux vagues influence aussi l'abondance, la richesse spécifique et la distribution des communautés de macrophytes dans les plans d'eau [95] [96]. L'action des vagues peut avoir un effet direct sur la biomasse des plantes par fragmentation, allant de l'affaiblissement des individus jusqu'à leur déracinement [97]. Certaines espèces sont capables de s'adapter en modifiant leur morphologie, la taille de certains organes ou leur architecture [98] [99]. Les vagues ont également des effets indirects sur les plantes car elles modifient la composition du substrat, pouvant le rendre défavorable aux développement des plantes et à leur enracinement [100] et favorisent la remise en suspension, ce qui limite la diffusion de la lumière dans l'eau [101], [102]. En effet, une très grande majorité des herbiers denses formés par des plantes à tige longue au large des plans d'eau se développe dans les zones protégées des vents [84]. La distribution de ces espèces est le plus souvent comprise entre 2 et 4 m de profondeur, position contrainte par les vagues à proximité des rives (hydrodynamique intense), par la disponibilité de la lumière et par la pression hydrostatique dans les zones plus profondes. Les zones calmes permettent également aux plantes de bénéficier de substrats organiques qui n'ont pas été remobilisés par l'action des vagues. À noter que les tiges de ces plantes réduisent le courant localement, ce qui provoque l'accumulation de matières en suspension au pied des herbiers, favorisant leur développement grâce aux nutriments mis ainsi à leur disposition sur les sols sableux, peu favorables à leur enracinement et à leur croissance [103] [104]. L'action des vagues semble plutôt favorable aux communautés de plantes inféodées au sédiments oligotrophes tels que les isoétides, dont les rosettes au feuilles plus courtes et rigides, ainsi que les racines nombreuses et profondes, leur permettent de se maintenir dans les zones des lacs où l'hydrodynamique est plus intense [85]. Les vagues maintiennent des conditions favorables au développement des isoétides en limitant le dépôt de matière organique sur le sédiment, potentiellement néfaste à leur développement.

3

Impacts du changement climatique

©F. Prud'homme - Lac Paradis

3.1

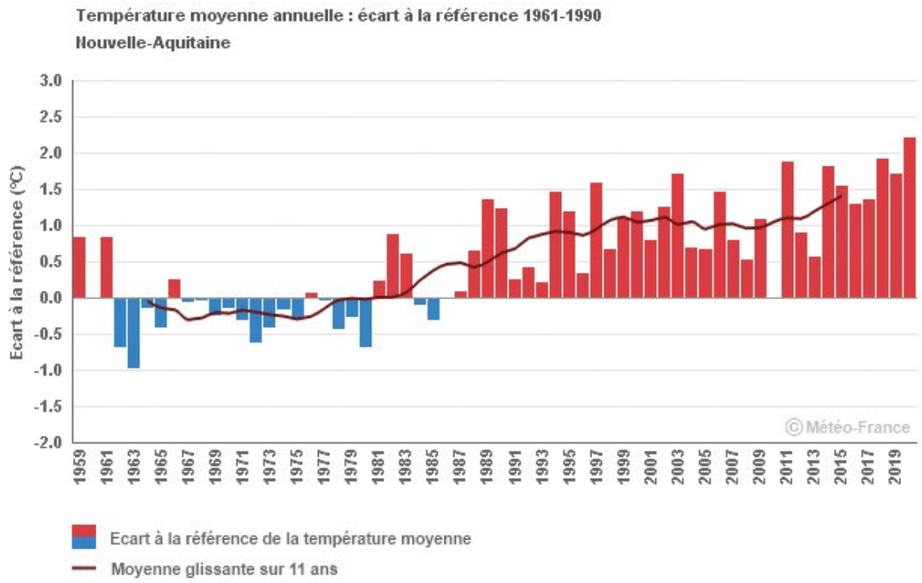
LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

Les mouvements de l'atmosphère et des océans définissent pour une très large part le cycle de l'eau sur notre planète. La région Nouvelle-Aquitaine, comme toutes les régions du monde, dépend de ce que l'on peut appeler la « grande échelle climatique », qui décrit des évolutions couvrant des zones de plusieurs milliers ou dizaines de milliers de kilomètres d'amplitude (note : cette grande échelle est plutôt qualifiée de petite échelle dans le domaine de la géographie). Les « territoires », c'est-à-dire toutes les zones plus localisées, sont donc marqués par des phénomènes qui ne leur laissent qu'un domaine d'évolution limité. Certaines des conséquences de cet état de fait ont été décrites dans les deux rapports de 2013 [105] et 2018 [106]. Elles ne concernent pas seulement les températures ou les précipitations, mais aussi d'autres facteurs abiotiques comme les courants et de fait, les milieux, les ensembles biologiques et le rôle de certaines composantes de la surface terrestre, qui vont répondre directement ou indirectement à cette grande échelle et à son évolution.

On évoque dans ce cadre la notion de changement climatique, quand il existe une évolution statistique discernable sur une période de quelques dizaines d'années. Ces évolutions peuvent avoir une origine « naturelle » (non liée aux activités humaines), mais aussi une origine liée aux activités humaines désormais perceptible de manière croissante. La **Figure 12** montre une hausse des températures annuelles sur la région Nouvelle-Aquitaine depuis les années 60, que l'on peut retrouver aussi sur l'ensemble de la zone Europeo-Atlantique, et de manière plus générale sur une grande partie de la planète. Le réchauffement est calculé à partir de données annuelles, et malgré quelques fluctuations liées à la variabilité interannuelle, la hausse est tout à fait significative du point de vue statistique. Le réchauffement qui se fait à l'échelle globale (+1,1 °C dans le 6e rapport GIEC – IPCC [107]) confirme donc sa matérialisation à l'échelle locale. La série de températures présentée sur cette figure indique que le climat de la Nouvelle-Aquitaine s'est déjà réchauffé d'environ +1,5 °C depuis les années 1960 et que l'année 2020 a été la plus chaude depuis le début des enregistrements. Cette évolution est attribuable en grande partie à l'augmentation des gaz à effet de serre (Regional fact sheet [107]). Et tant que la neutralité carbone ne sera pas atteinte, c'est-à-dire tant que l'on n'aura pas obtenu le niveau zéro émission nette sur l'ensemble de la planète, ces températures continueront de croître.

Dans un cadre régional où l'accent est mis sur les ressources en eau, mettre en évidence des évolutions climatiques est plus difficile, parce que ce qui relève d'effets naturels ou anthropiques est compliqué à démêler, et parce que le rôle de la variabilité saisonnière y est aussi très important. Les **Figures 13 et 14** condensent un ensemble d'informations très important pour comprendre l'impact local depuis les années 1960 des régimes de temps prédominants sur l'Europe et l'Atlantique. Elles s'articulent autour du rôle joué par la dépression d'Islande et l'anticyclone des Açores. Selon les saisons (la **Figure 13** correspond à l'hiver, la **Figure 14** correspond à l'été), selon le positionnement des anticyclones et des dépressions, on peut décrire 4 situations possibles (par saison donc 8 au total), qui génèrent des impacts en termes de température et de précipitation. Ces différentes situations sont obtenues comme le résultat d'analyses mathématiques complexes – mais très largement éprouvées [108] - qui groupent sous forme de « clusters » les différents modes de variabilité de notre climat et leurs impacts locaux. Ces modes de variabilité du climat continueront à exister en climat futur et viendront moduler les effets globaux du changement climatique liés à l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre.

Figure 12 : *Évolution de la température moyenne annuelle en Nouvelle-Aquitaine entre les années 1959-2020. Représentation des écarts par rapport à une valeur de référence. Météo France.*



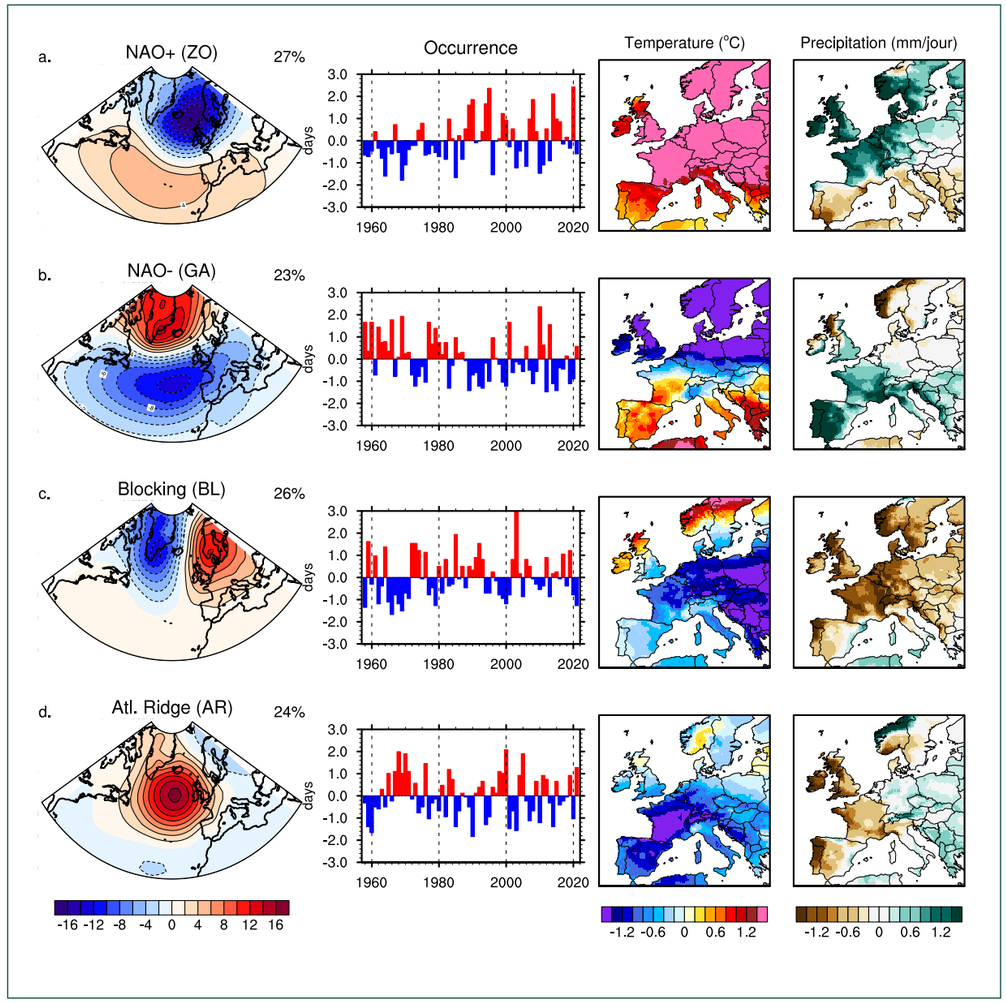


Figure 13 : *Les différents régimes climatiques correspondant à l'hiver : la première colonne donne les anomalies en matière de pression au niveau de la mer, la deuxième montre l'évolution de la fréquence d'apparition de chacun des modes, les troisième et quatrième colonnes les variations associées de température et de précipitations. Cette figure montre que les « climats hivernaux » les plus fréquents sont très différents les uns des autres, et les scénarios d'évolution climatique, donc de précaution et d'anticipation, sont nécessairement multiples.*

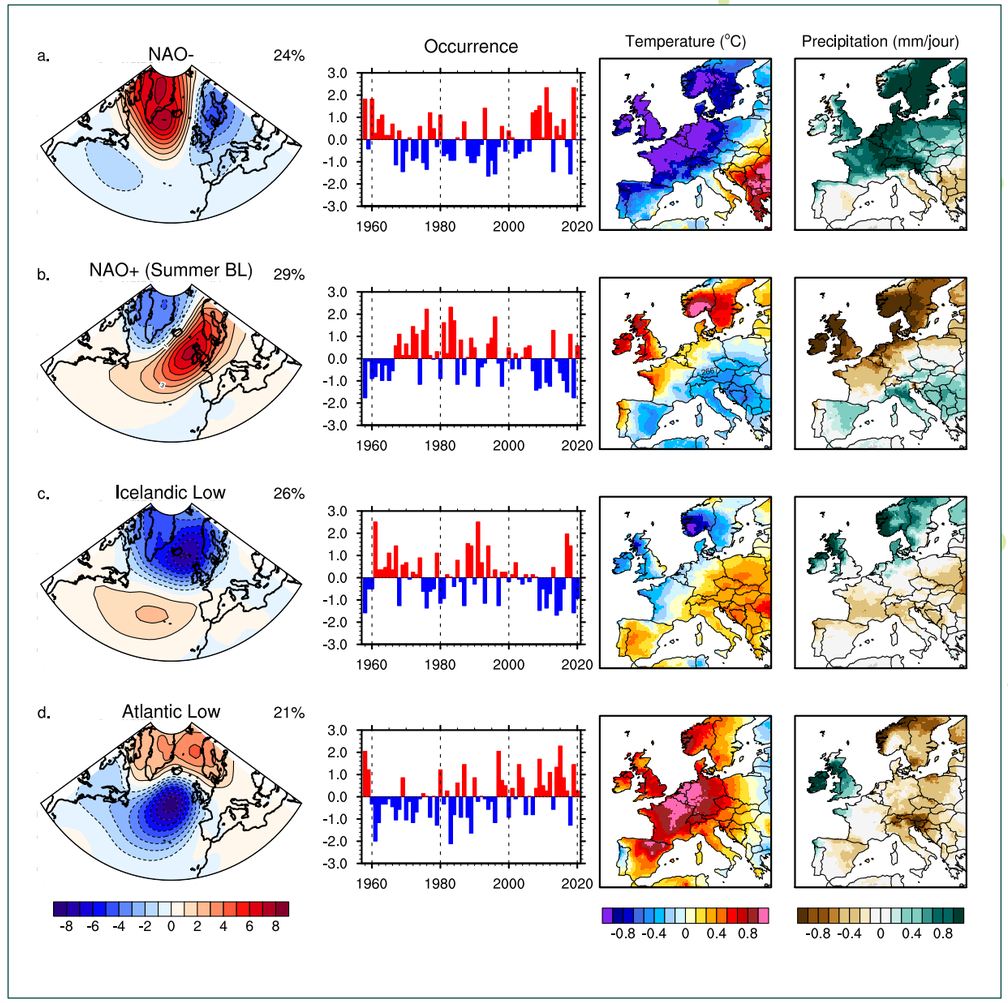


Figure 14 : *Les différents régimes climatiques correspondant à l'été : la première colonne donne les anomalies en matière de pression au niveau de la mer, la deuxième montre l'évolution de la fréquence d'apparition de chacun des modes, les troisième et quatrième colonnes les variations associées de température et de précipitations. Les différences entre les Figures 13 et 14 illustrent la difficulté d'une réflexion qui s'appuierait sur une évaluation annuelle.*

La figure 15 montre le cumul annuel des précipitations, calculées année après année entre 1959 et 2020. Les niveaux de précipitations varient de part et d'autre de la ligne moyenne et il est difficile d'y voir la marque d'un changement de fond important mais plutôt les effets d'oscillations climatiques multi-annuelles. Le pas de temps annuel n'est pas suffisant pour caractériser les impacts dans le domaine de l'eau et les analyses statistiques qui doivent donc aussi considérer les évolutions saisonnières. Ainsi, l'augmentation globale des températures aura pour effet d'augmenter le pouvoir évaporatoire de l'atmosphère ainsi que l'évapotranspiration des végétaux. Parallèlement, une atmosphère plus chaude a la capacité à contenir plus de vapeur d'eau, et augmente également sa capacité à transporter de l'eau. Ces caractéristiques confèrent à l'atmosphère une capacité augmentée à pouvoir précipiter localement de plus grandes quantités et donc des risques d'évènements extrêmes. Il est donc possible d'envisager le manque d'eau comme un des critères de définition de zones sèches ou humides à grande échelle [109]. A l'échelle régionale, ces grandes tendances sont bien évidemment sujettes à variabilité, mais la vulnérabilité des territoires sauf cas spécifique, ne peut déroger à ces grandes règles qui contrôlent ainsi l'évolution de la disponibilité en eau.

La figure 16, montre la variabilité par décennie de la sévérité des tempêtes majeures ayant touché la Nouvelle-Aquitaine. Il apparaît que le nombre d'événements, plus important dans les années 1980, n'a pas de lien avec la sévérité, plus forte lors de la tempête Martin en 1999, Klaus en 2008 ou Xynthia en 2011. La notion de danger, clairement démontrée à l'échelle de la planète, apparaît ainsi comme un élément qui n'a d'existence que statistique quand on la considère à l'échelle locale. Mais cette statistique est essentielle car elle définit les zones exposées aux aléas hydrométéorologiques. Ces informations posent la question des impacts attendus en Nouvelle-Aquitaine pour les années à venir, lorsque aucune tendance claire ne se dégage des observations passées. Les rapports AcclimaTerra de 2013 et 2018 [105] [106] citent des scénarios possibles décrits par les modèles climatiques qui restent souvent en cohérence avec les tendances observées depuis cette date. On peut s'attendre par exemple que « le Sud-Ouest fera face à un risque récurrent de sécheresses estivales, qui reste toujours croissant dans les décennies à venir, avec des sécheresses qui accompagneront un réchauffement général marqué par des vagues de chaleur plus nombreuses » et par le risque déjà manifesté d'incendies importants. De plus « Il est aussi important de rappeler que la Nouvelle-Aquitaine, avec sa très longue façade maritime, ses activités économiques en zones inondables (dans le bassin d'Arcachon, le long de la Gironde), est particulièrement sensible au relèvement moyen du niveau de la mer ». Un relèvement de quelques dizaines de centimètres est anticipé pour la fin de ce siècle. Pour l'évolution du risque de tempêtes aux impacts majeurs sur notre région, aucune tendance claire ne se dégage ni des observations, ni des projections climatiques.

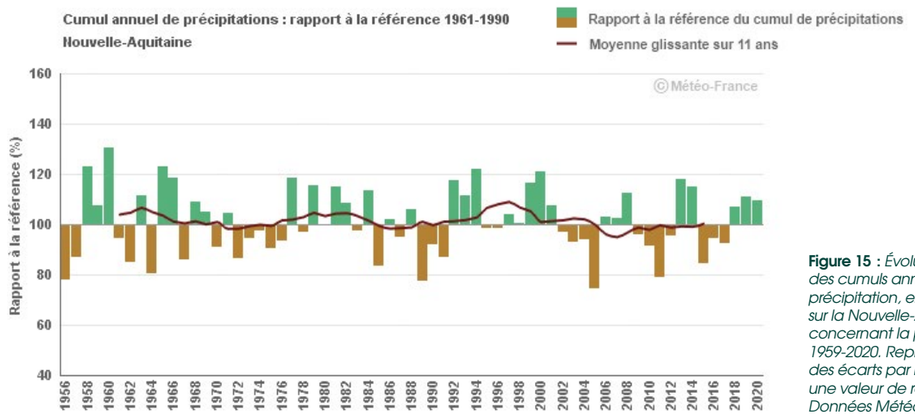


Figure 15 : *Évolution des cumuls annuels de précipitation, en moyenne sur la Nouvelle-Aquitaine, concernant la période 1959-2020. Représentation des écarts par rapport à une valeur de référence. Données Météo France.*

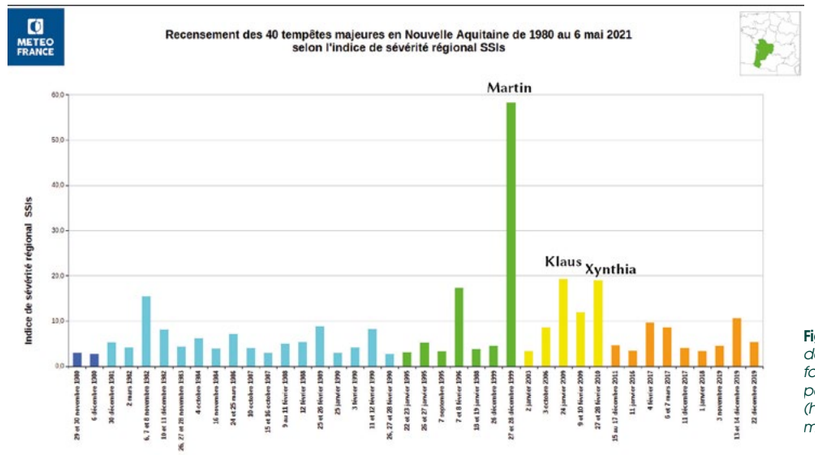


Figure 16 : *Représentation des 40 événements les plus forts depuis 1980, séparés par couleur par décennie. (http://tempetes.meteofrance.fr/).*

3.2

CONSÉQUENCES SUR LE FONCTIONNEMENT PHYSIQUE ET CHIMIQUE

L'augmentation de phénomènes extrêmes, tels que les crues, les tempêtes et les périodes de sécheresse, est une des conséquences du changement climatique [110]. Des vents violents et des précipitations associées aux tempêtes peuvent affecter les plans d'eau par des apports soudains du bassin versant et un brassage de la colonne d'eau [111]. Cela peut aussi modifier les caractéristiques biogéochimiques de la colonne d'eau et des sédiments impactant les producteurs primaires et par voie de conséquence les autres compartiments du réseau trophique. Plus globalement ces évènements extrêmes doivent être appréhendés à l'échelle du plan d'eau et de son bassin versant car les impacts sont multiples et en interrelations. La famille de plan d'eau a aussi son importance car les étangs de faible profondeur (sans stratification estivale) et les lacs profonds (stratifiant une partie de la saison estivale) ne réagiront pas de la même façon à ces évènements [112]. Par exemple, l'augmentation de la fréquence de précipitations extrêmes devrait augmenter les phénomènes d'érosion du bassin versant, accélérant l'enrichissement trophique et le comblement des plans d'eau [113]. Dans le sud de la Nouvelle-Aquitaine, ce sont les apports de sable accompagnés de matières organiques qui vont contribuer le plus aux comblements.

Pour les plans d'eau plus profonds, les éventuelles modifications devraient surtout dépendre des modifications du régime des vents. Dans les étangs limousins, profonds, le système de soutirage des eaux par moine de vidange provoque un écart de température entre l'émissaire et les tributaires dont le maximum arrive en fin de nuit et le matin [114]. Un éventuel réchauffement des nuits pourrait augmenter la température des tributaires sans modifier celle du fond de l'étang (donc diminuer l'écart entre émissaire et tributaire). Dans ces étangs, le calcul du nombre de Wedderburn (un indice permettant de comparer les forces de construction et de destruction de la stratification) a montré qu'une augmentation des brises et vents légers renforcerait la stratification, par approfondissement de la thermocline, tandis qu'un accroissement des vents forts détruirait plus souvent la stratification. Pour les petits étangs, la forme de l'étang jouerait un rôle important sur le fetch [115]. De façon indirecte, le changement climatique pourrait aussi modifier l'hydrodynamique des plans d'eau par l'intermédiaire des variations du bilan hydrologique. Plus le quotient entre la superficie du bassin versant et la superficie du plan d'eau est élevé, plus celui-ci dépend des apports en eau des tributaires et plus le temps de renouvellement des eaux est court. M. Carlini [116] a étudié l'importance des courants causés par l'entrée des cours d'eau dans les plus grands étangs limousins et a montré que l'eau fluviale, plus froide que l'étang en été, plongeait dans les couches profondes du plan d'eau. Si le changement climatique réchauffait l'eau des tributaires, les apports du bassin resteraient plus superficiels.

A l'échelle mondiale, le changement climatique impacte le régime des précipitations [110]. Des périodes de sécheresse plus longues, un allongement de la période estivale avec néanmoins des évènements pluvieux plus soudains et violents sont à prévoir [62]. La réduction des précipitations est attendue, entraînant des modifications hydrologiques telles que la réduction des débits entrant dans les plans d'eau. En Nouvelle-Aquitaine, les lacs littoraux peu profonds se développent sur des surfaces relativement planes, en pente faible. Ils font partie intégrante du *continuum* des écoulements souterrains, constitué par l'interaction de la nappe du plio-quaternaire, des petites rivières et des eaux de surface peu profondes. Leur hydrologie dépend de la fluctuation de la nappe phréatique et leur volume varie en fonction de l'approvisionnement en eau du bassin de drainage [117]. Dans les scénarios de changement climatique [118], la survenue de périodes de sécheresse prolongées, accompagnée d'une évapotranspiration accrue dans les bassins de drainage, affecterait considérablement la quantité d'eau atteignant la nappe phréatique [119] et soumettrait les zones planes des lacs à des périodes prolongées d'exposition à l'air. Le passage d'habitats submergés à habitats exposés à l'air impliquerait potentiellement la disparition de la végétation submergée et l'augmentation des émissions de carbone [120] [121]. Le même risque est couru par les *lagunes* : ces petits milieux aquatiques subissent des fluctuations du niveau d'eau de manière saisonnière et peuvent supporter des asséchements occasionnels. Grâce à l'alternance des périodes d'immersion/émersion, ces milieux sont reconnus comme ayant un rôle important de filtre pour les nutriments transitant dans le bassin versant par lessivage. Ailleurs dans le monde, on retrouve des milieux similaires au nord de l'Europe ou au Canada, et ils sont reconnus pour stocker des quantités importantes de carbone dans le sol. En Nouvelle-Aquitaine Augusto *et al.* [122] ont mis en évidence que le sol des landes humides, sous-jacent ou entourant les *lagunes*, peut stocker plusieurs tonnes de carbone par hectare. Cependant aucune information n'existe par rapport aux émissions de carbone dans ces milieux en Nouvelle-Aquitaine. La nature oligotrophe et acide caractéristique du sol sableux du plateau landais [122] pourrait en fait avoir pour résultats des émissions de carbone très faibles par rapport à d'autres milieux similaires ; cela augmenterait l'importance de leur rôle dans le stockage du carbone. Actuellement, plusieurs actions sont menées par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne en concertation avec les syndicats de gestion des bassins versants des lacs côtiers, pour restaurer ou conserver ces milieux, qui sont aussi un siège important de biodiversité. Dans un scénario futur, la plupart des *lagunes* serait en fait portée à s'assécher suite à des épisodes prolongés de sécheresse ou suite au drainage accéléré du réseau hydrographique.

Le changement climatique peut impacter, par différentes voies, les trajectoires et les vitesses d'eutrophisation des plans d'eau. L'impact du changement climatique vient en plus s'additionner à d'autres effets du changement global lié à l'occupation du sol. L'augmentation de la pression agricole en Nouvelle-Aquitaine peut mener à une augmentation du risque d'eutrophisation. Par exemple, les lacs médocains de Carcans-Hourtin et de Lacanau sont en zone sensible à l'eutrophisation en raison des vastes surfaces agricoles présentes en tête du bassin versant. Selon une étude du CEMAGREF datant de 1992, on obtient un export d'azote de 1 kg ha^{-1} an^{-1} pour les bassins versants forestiers contre 19 kg ha^{-1} an^{-1} pour les bassins versants mixtes (forêt et maïsiculture). Des valeurs similaires ont été mesurées en 2007-2008 sur le bassin versant du Bassin d'Arcachon [123]. Dans les lacs littoraux, des mesures en continu des teneurs en oxygène dissous ont permis d'estimer que, pendant certains étés chauds et calmes, les eaux de fond restent isolées de la surface durant 10 à 15 jours dans le lac de Carcans-Hourtin et présentent des épisodes d'anoxie [70]. De tels épisodes ont été relevés dans des lacs suisses pendant la canicule de 2003 [124] et sont en lien avec le risque de

©V. Bertrin - Lac de Carcans-Hourtin

relargage de phosphore (P) et donc d'eutrophisation. En Nouvelle-Aquitaine, il a été montré que le stock de P sédimentaire potentiellement remobilisable du lac de retenue de Bort-Les-Orgues sur la Dordogne était de plusieurs centaines de tonnes [68]. L'accroissement des conditions favorisant l'anoxie des eaux de fond pourrait jouer sur les flux benthiques de P vers la colonne d'eau. Une conclusion similaire a été déduite de l'étude de barrages situés sur la Creuse [125] [126].

Le changement climatique renforcerait les conséquences de l'eutrophisation via la baisse de solubilité des gaz dissous et les impacts sur le cycle des nutriments [127] [128]. Les précipitations et l'évaporation contrôlent les flux d'eau et influencent la profondeur des lacs, les temps de résidence et les apports externes du bassin versant. Les variations de température affectent les réactions biogéochimiques incluant les processus de reminéralisation de la matière organique [129]. L'augmentation des températures stimule la reminéralisation de l'azote et du phosphore et a un effet négatif sur la rétention des nutriments dans les plans d'eau [130]. La plupart des études qui décrivent les capacités de piégeage des nutriments ont été réalisées sous climat tempéré (e.g. [131] [132] [133] [134]) et quelques-unes dans des régions méditerranéennes et semi-arides [135] [136] [137].

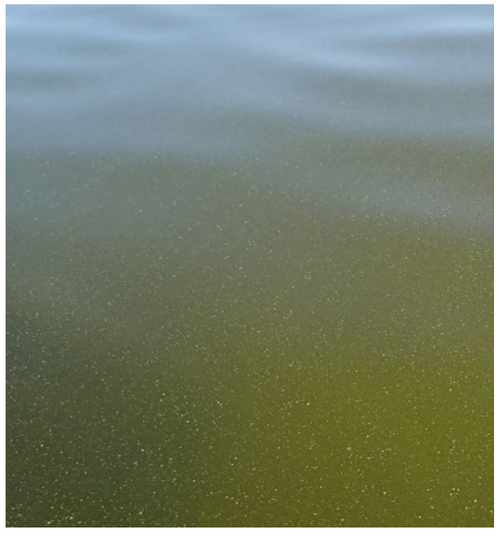
Le changement climatique a donc des effets négatifs sur le devenir des plans d'eau et leurs états trophique et écologique. Afin de freiner, voire d'éviter certaines de ces conséquences, des actions de remédiation ou de prévention peuvent être envisagées [62]. Au cours des décennies récentes, des efforts importants ont été menés afin de limiter les flux de nutriments vers les exutoires via les cours d'eau. Ces efforts ont été encouragés par une prise de conscience collective au niveau des États européens concernant l'importance de la préservation de la ressource en eau, d'où la Directive Cadre sur l'Eau adoptée par le parlement européen en 2000 (cf. Rapport Acclima-Terra [106]). Les mesures prises sont de diverses natures. Parmi les principales, citons l'amélioration de la gestion des eaux usées, une optimisation des pratiques agricoles vis-à-vis des intrants et la restauration des cours d'eau et des zones humides. Ainsi les activités humaines ont grandement amplifié les flux de nutriments issus des bassins versants par rapport au bruit de fond naturel [138], et ce sont des mesures de gestion conduites par les acteurs des territoires qui permettent aujourd'hui une amélioration de la qualité des eaux. Certaines ont pu être mises en œuvre sur le territoire de la Nouvelle-Aquitaine. Des restaurations de la qualité des eaux des têtes de bassin versant des tributaires des plans d'eau font partie de ces actions. Des travaux d'amélioration des stations d'épuration et des systèmes de traitements des eaux industrielles [73] ont déjà pu être réalisés. Ces travaux contribuent à l'amélioration des rejets avant leur déversement dans le milieu naturel (par tributaires en général). De la même façon la réduction des intrants agricoles à l'échelle des bassins versants permet de limiter la fraction lessivable lors d'épisodes pluvieux. Cependant, on peut s'attendre à ce que dans le futur, les changements climatiques modifient significativement les flux de nutriments vers les plans d'eau, en raison du changement du régime des précipitations, ainsi que des modifications de l'usage des sols et de l'adaptation des pratiques agricoles ou sylvicoles au réchauffement climatique.

LES CYANOBACTÉRIES ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Sur le long terme, le changement climatique peut, directement et indirectement affecter le phénomène d'eutrophisation, par la modification (i) des températures, (ii) des précipitations, (iii) des régimes de vent. L'augmentation des températures stimule le développement du phytoplancton, en particulier celui des cyanobactéries [139], ce qui peut aggraver les effets de l'eutrophisation. En effet ces hausses de température accélèrent l'évaporation des eaux réduisant les hauteurs d'eau, ce qui facilite l'accès à la lumière et aux nutriments stockés dans les sédiments pour les producteurs primaires. Le développement des cyanobactéries se trouve aussi favorisé par des températures des eaux plus proches de leur optimum et des durées de stratification des eaux qui s'allongent [112]. L'augmentation des températures devrait aussi favoriser le relargage des nutriments des sédiments [140]. L'augmentation des températures pourrait jouer sur la durée de vie et les taux de multiplication des producteurs primaires, faisant ainsi augmenter le pH des eaux [141]. Les modifications de pH dépendent des processus en jeu à l'échelle des bassins versants [142]. Il faut garder à l'esprit que les interactions entre le réchauffement climatique et l'eutrophisation ne sont pas linéaires. Elles ne conduisent pas systématiquement à une augmentation des efflorescences de cyanobactéries car elles dépendent des niveaux trophiques des plans d'eau et des espèces présentes [62].

L'augmentation de la vitesse des vents devrait remobiliser les nutriments des sédiments [143] sur les grands plans d'eau peu profonds de Nouvelle-Aquitaine, favorisant ainsi la production primaire ; en même temps, le vent pourrait limiter le développement d'efflorescences, en dispersant les colonies de cyanobactéries [144] sur Parentis-Biscarrosse notamment. Dans un certain nombre de retenues de forme allongées de la région, les vents devraient contribuer à l'accumulation du phytoplancton, dont les cyanobactéries, dans certaines zones pouvant nuire aux usages. Ces accumulations pourraient réduire la biodiversité par la limitation de la pénétration de la lumière nécessaire aux végétaux enracinés. Cette limitation de la lumière va être profitable aux cyanobactéries dont certaines peuvent adapter leur localisation dans la colonne d'eau. Elles risquent de devenir plus compétitives que les autres composantes du phytoplancton. Certaines espèces plus dynamiques pourraient prendre le dessus et la communauté pourrait se spécialiser entraînant une baisse de la diversité, une homogénéisation des peuplements. Cela peut aussi favoriser l'apparition d'espèces de cyanobactéries exotiques comme cela peut s'observer sur le lac de Parentis-Biscarrosse [145]. Elles ne sont néanmoins pas envahissantes, jusque-là, mais leurs dynamiques de colonisation pourraient évoluer.

Une autre conséquence forte des augmentations des biomasses de cyanobactéries est le risque accru de production de cyanotoxines (métabolites secondaires) nuisibles aussi bien pour l'Homme que pour les animaux. La production de toxines dépend des genres de cyanobactéries présents et d'un certain nombre de conditions environnementales, physiologiques, etc. pas encore toutes bien connues [146]. Bien que pouvant varier à l'échelle locale selon certaines modélisations [147], la présence des cyanotoxines a des impacts sur les activités de baignade, la production d'eau potable et les activités nautiques [148]. En Nouvelle-Aquitaine la limitation des activités impacte surtout des retenues du nord de la région (barrage d'Eguzon - Qsair, 2019) et quelques plans d'eau du littoral (Parentis-Biscarrosse, Léon). Des fermetures de baignade ou bien des restrictions de pêche durant plusieurs semaines ont pu être observées et ces conséquences peuvent être exacerbées par le changement climatique. Sur certains sites se poseront, avec le temps, des problématiques de conflit d'usages [149] ou entre communes partageant un même plan d'eau. Par exemple, sur de petits plans d'eau, il est en effet difficile de concilier des activités de baignade, nécessitant des eaux sans cyanobactéries, avec certaines activités de pêche avec appât (par exemple, la bouillette dans la pêche à la carpe) qui contribuent à l'augmentation des apports en nutriments favorisant leur développement.



Colonies de cyanobacteries visibles à la surface de l'eau - Lac de Parentis-Biscarrosse (©C. Ribaudo)

Cyanobactérie au microscope - Dolichospermum flos-aquae grossissement x 600 (©C. Laplace-Treyture)

3.3

CONSÉQUENCES SUR LA FAUNE ET LA FLORE

Dans les milieux lentiques, le changement climatique bouleverse les conditions environnementales, le milieu de vie (biotope) des espèces tel que décrit dans les sections précédentes. La principale cause de l'effondrement de la biodiversité est la dégradation ou la disparition des biotopes qui hébergent les espèces [25] **(Figure 17)**. Au-delà de la destruction directe des biotopes aquatiques et riverains par l'Homme, le changement climatique, en modifiant le fonctionnement des écosystèmes lacustres (variation des niveaux d'eau, eutrophisation, durée du couvert de glace) contribue aussi fortement à la disparition de ces biotopes.

Les espèces dites « généralistes », *i.e.* les espèces dont la niche écologique est assez large et qui sont capables de survivre à une grande variation des conditions environnementales devraient s'adapter facilement au changement climatique [150]. C'est le cas par exemple des espèces eurythermes, *i.e.* celles capables de s'adapter à des variations de températures importantes, comme la carpe commune [151]. Cette adaptation aux conditions locales est d'autant plus facile si les populations sont relativement abondantes et possèdent une diversité génétique importante [152]. Les espèces dites « spécialistes », *i.e.* celles dont la niche écologique est relativement restreinte et qui dépendent de conditions environnementales très spécifiques, devront pour survivre migrer vers de nouveaux habitats [153]. Les lacs des Pyrénées et les *lagunes* du plateau landais abritent de nombreuses espèces d'invertébrés boréo-alpines [154]. La plupart de ces espèces sont des sténothermes d'eau froide, pour lesquelles une régression est probablement déjà en cours, comme observé en Suisse [155]. Parmi ces espèces, des insectes aquatiques (*Boreonectes multilineatus, Arctocorisa carinata, Gyrinus natator*) ou des libellules (*Aeshna juncea, Leucorrhinia albifrons*) sont assez emblématiques des *lagunes* landaises ou des lacs des Pyrénées [156] [157] [158], car la plupart de ces espèces jouent le rôle de superprédateur et peuvent avoir une influence majeure sur l'ensemble de l'édifice trophique [159]. Pour pouvoir migrer si les conditions du milieu changent, ces espèces doivent avoir des capacités de dispersion suffisantes. Les espèces des plans d'eau de faible altitude pourront par exemple se déplacer vers les milieux d'altitudes plus élevées si ces habitats deviennent favorables ou vers des latitudes plus septentrionales. Mais si les espèces ne peuvent pas s'adapter localement ou migrer en raison de faibles capacités de dispersion et/ou d'absence d'habitats favorables, comme les espèces des lacs pyrénéens, dont des communautés végétales sont constituées d'espèces boréo-arctiques circumboréales, elles seront vraisemblablement condamnées à disparaître [153] [34]. Le lien entre la température et la concentration en oxygène dissous dans l'eau est un facteur très structurant pour les peuplements piscicoles, et notamment pour les communautés limousines [160]. Pour les organismes ectothermes, l'augmentation des températures modifie la taille des individus, en sélectionnant des individus de plus petite taille [161] [162]. Cette réduction de taille est reconnue comme une des conséquences majeures de l'effet du réchauffement climatique sur les communautés animales [165] et a des impacts en cascade sur l'ensemble de la chaîne trophique [163] [164]. A contrario, le succès compétitif de certaines espèces de phytoplancton a pu être expliqué par des dimensions plus larges de ces organismes, moins soumis à la prédation [165]. Outre l'effet sur la taille, l'augmentation des températures modifie également la qualité nutritionnelle des producteurs primaires provoquant un effet cascade sur les autres niveaux du réseau [166]. Des modifications dans les traits associés au comportement alimentaire de la microméiofaune lacustre, liées aux conditions de température, ont été observées par Neury-Ormanni [167] dans des conditions de laboratoire. Les espèces rares, qu'elles soient végétales ou animales, sont particulièrement vulnérables à la dégradation ou à la disparition des biotopes, car elles possèdent une répartition géographique limitée, une spécificité d'habitat très restreinte ou une petite taille de population [168] [169]. Face à des perturbations, les espèces peuvent soit disparaître, s'adapter ou se développer sur des nouveaux habitats [153] [170]. En Nouvelle-Aquitaine, un programme de recherche a été lancé, « Les sentinelles du climat », visant à suivre de près l'évolution de certaines espèces particulièrement menacées

Figure 17 : *Exemple d'altérations hydromorphologiques des rives du lac de Cazaux-Sanguinet. (©V. Bertrin)*

Figure 18 : *Herbier monospécifique d'élodée du Canada (Elodea canadensis) dans un lac de montagne. (©F. Prud'homme)*

par le changement climatique, car elles présentent des niches écologiques très restreintes [171]. Les relevés ont été effectués au sein de plusieurs milieux naturels de Nouvelle-Aquitaine (dunes, hêtraies, pelouses calcicoles…), dont certains plans d'eau. En particulier, les cortèges floristiques, ainsi que les populations de libellules et des batraciens, ont été suivis pendant 6 ans dans les étangs arrière-littoraux et dans les *lagunes*. L'objectif général de ce travail est de construire des indicateurs à utiliser dans un programme de surveillance de la biodiversité à long terme, à l'instar des actions de suivi et modélisation menées par les climatologues [172].

Si certaines espèces indigènes peuvent être favorisées par le dérèglement climatique, c'est aussi le cas des espèces exotiques qui peuvent parfois devenir envahissantes. Dans les lacs de montagne, le réchauffement des eaux peut favoriser le développement de populations d'espèces exogènes végétales (*Elodea canadensis* pour les espèces de macrophytes – **Figure 18**) ou animales, comme les poissons introduits : l'omble de fontaine (*Salvelinus fontilanis*), le vairon (*Phoxinus phoxinus*), le goujon (*Gobio gobio*), la perche soleil (*Lepomis gibbosus*) (**Figure 19**). Ces espèces peuvent déstabiliser les réseaux trophiques dans ces eaux naturellement apiscicoles et oligotrophes. Du Nord au Sud de la côte de Nouvelle-Aquitaine, les lacs et les étangs sont eux aussi impactés depuis plusieurs décennies par la présence de macrophytes exotiques à caractère envahissant. Parmi eux, on retrouve des espèces amphibies, tels que les jussies (*Ludwigia* spp.) et le myriophylle du Brésil (*Myriophyllum aquaticum*), et des espèces submergées, telles que l'élodée dense (*Egeria densa*) et le lagarosiphon (*Lagarosiphon major*). Les biomasses importantes produites par ces espèces, dès que les conditions du milieu leur sont favorables, peuvent parfois créer des nuisances telles que l'entrave à la pratique de certains usages des plans d'eau (nautisme principalement). Ces espèces ont fait l'objet de nombreux suivis depuis plusieurs décennies dans la région, notamment dans les plans d'eau littoraux [173] [174] [84]. L'augmentation des températures automnales pourrait favoriser leur développement ainsi que le maintien d'une canopée haute dans la colonne d'eau, améliorant leurs capacités de survie en hiver et de régénération au printemps [175] [176]. Ces espèces créent de plus un habitat favorable à leur propre développement à un niveau très local, tout en affectant les processus biogéochimiques du milieu lacustre à l'échelle de l'écosystème [49] [52] [86]. Néanmoins, l'intensité des changements n'est pas encore prévisible localement et il est difficile d'anticiper aujourd'hui leurs impacts potentiels sur la diffusion de ces plantes.

L'introduction de certaines espèces de macrophytes exotiques a également été mentionnée, en plus du transport dû aux migrations d'oiseaux, comme voie probable d'introduction de taxons de phytoplancton tropical et subtropical [177]. L'installation pérenne de phytoplancton exotique dans les lacs de Cazaux-Sanguinet et Parentis-Biscarrosse a été favorisée par le réchauffement des eaux, spécialement au printemps et en été [177] [28] [168]. Parmi les espèces d'invertébrés exotiques favorisées par le réchauffement climatique, l'Écrevisse de Louisiane (*Procambarus clarkii*) est probablement la plus impactante en Nouvelle-Aquitaine et en Europe [178] : elle peut altérer l'intégralité des écosystèmes lentiques envahis et leur réseau trophique [179]. Son omnivorie lui permet de consommer une grande variété de ressources alimentaires (zooplancton, macroinvertébrés, macrophytes [180], pouvant conduire à l'extinction de certaines espèces en Nouvelle-Aquitaine [181], soit parce qu'elles sont directement consommées, soit suite à la destruction de leur habitat. En éradiquant la végétation pour s'alimenter, elle intensifie la turbidité des plans d'eau peu profonds [182]. Son impact sur les écosystèmes lacustres pourrait encore s'aggraver avec le réchauffement climatique, cette espèce pouvant modifier son comportement alimentaire, par exemple en privilégiant l'herbivorie lorsque les températures sont plus élevées [183].

Figure 19 a

Enfin, le changement climatique, en favorisant le développement des espèces généralistes capables de s'adapter facilement peut provoquer une homogénéisation des communautés [150], non seulement au niveau taxonomique mais également au niveau fonctionnel [184]. Par exemple, Keck *et al.* [185] ont récemment démontré une homogénéisation des communautés microbiennes depuis la fin du XIXe siècle, en particulier pour les lacs de faibles altitudes (moins de 1000 m), représentant la majorité des lacs de Nouvelle-Aquitaine. C'est notamment le cas des communautés de cyanobactéries [186], dont l'homogénéisation des communautés s'accompagne d'un développement des taxons potentiellement toxiques. D'autres études montrent cependant que l'homogénéisation des communautés n'est pas forcément liée au changement climatique mais à d'autres perturbations anthropiques [187] soulignant la difficulté d'isoler les effets multiples liés à l'anthropisation.

En modifiant la présence, le développement, ou le comportement de quelques espèces seulement, le dérèglement climatique a des répercussions en cascade sur tout l'écosystème, puisque les espèces sont toutes interdépendantes (réseau trophique, compétition, facilitation, rôle fonctionnel dans la régulation des processus biogéochimiques, etc.). En particulier, la disparition de prédateurs clés (espèces qui limitent fortement la présence d'autres espèces de niveau trophique inférieur) et d'organismes « ingénieurs » (espèces qui modulent la disponibilité des ressources pour les autres espèces) va avoir des effets en cascade sur l'entièreté de réseau trophique. Pourtant, l'impact du changement climatique a surtout été étudié au niveau de la population, alors que son impact à plus large échelle d'organisation biologique est comparativement beaucoup moins étudié [188] [189] [190]. A l'échelle des communautés, des enregistrements paléolimnologiques ont fourni des preuves quant à l'amplification du réchauffement climatique et à son impact sur les écosystèmes lacustres d'altitude [191]. D'après une étude détaillée de la réponse de l'écosystème du lac Redó (Pyrénées centrales) aux fluctuations de températures au cours des deux siècles passés, il est par exemple apparu que le groupe des chironomides connaissait un changement des taxons de sa communauté en lien avec la hausse des températures estivales [192]. Ce groupe pourrait ainsi constituer un indicateur sensible des changements de températures sur de longues échelles de temps telles que l'Holocène et pertinent pour comparer les données entre les différents lacs.

L'impact de modifications du régime des vents ou de la stratification sur le zooplancton reste largement méconnu. Les modifications des communautés zooplanctoniques semblent principalement indirectes, induites par des changements dans les communautés phytoplanctoniques [193]. Ainsi les vents peuvent affecter la composition et les densités d'algues phytoplanctoniques dans les plans d'eau peu profonds. Des vents plus faibles auraient tendance à favoriser le développement de blooms, tandis que des vents plus forts, en jouant sur le mélange des eaux, favoriseraient les algues vertes dans les milieux mésotrophes [194]. Le changement attendu du régime des vents, dont la tendance est une diminution des vents estivaux d'ouest au profit de vents de nord, nord-nord-est [195] [83], pourrait modifier progressivement la distribution et la composition spécifique des plantes aquatiques dans les plans d'eau. Néanmoins, l'intensité de ces changements est à ce jour difficilement quantifiable au niveau local. Ces modifications pourraient également affecter les communautés de poissons, de nombreuses espèces étant dépendantes des herbiers, lieu de ponte des espèces phytophiles comme le Brochet, et zone de refuge pour les juvéniles [196] [197].

Figure 19 a et b : *Espèces introduites en milieu lentique : a) banc de vairons (Phoxinus phoxinus) dans un lac de montagne (©F. Prud'homme) ; b) herbier de Lagarosiphon major en plan d'eau peu profond. (©C. Ribaudo)*

L'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, et notamment le CO_2, contribue également à l'acidification des eaux [198]. Cette acidification des eaux est néfaste pour les espèces végétales autochtones [199] comme animales, en particulier pour les organismes fortement tributaires des concentrations en calcium, dont la quantité disponible diminue avec l'acidification des eaux. C'est le cas des mollusques (bivalves, gastéropodes) et des crustacés (écrevisses, crevettes) dont l'exosquelette est essentiellement formé de carbonate de calcium. Ainsi, au nord de la région, dans la réserve du Pinail (département de la Vienne), Beaune *et al.* [77] estiment que 20 % des populations d'écrevisses à pattes blanches (*Austropotamobius pallipes, espèce menacée en danger d'extinction*) de la réserve disparaîtront d'ici 2060 si les émissions de CO_2 restent constantes. A l'inverse, d'autres espèces méditerranéennes semblent favorisées par le changement climatique. C'est le cas d'une libellule, le Trithémis annelé (*Trithemis annulata*) en expansion en Nouvelle-Aquitaine depuis les années 2000, ou le rare Anispos sarde (*Anisops sardeus*), un insecte aquatique non signalé depuis l'après-guerre dans la région, mais dont les observations se multiplient depuis une dizaine d'années [200].

Aux effets provoqués par le changement climatique se cumulent les impacts de diverses pressions anthropiques additionnelles. Parmi ces pressions, on peut identifier des perturbations liées directement aux utilisations locales des plans d'eau, mais également provenant du bassin versant.

- Localement au niveau des systèmes lacustres, ces perturbations, généralement liées aux usages récréatifs, peuvent être mécaniques (piétinement dans les zones de baignade, et développement des sports de nature), liées aux introductions d'espèces exogènes (en particulier introductions de salmonidés pour la pêche et secondairement les poissons appâts de type vairons), ou de nature chimique (par exemple, les produits cosmétiques de baignade) ;
- Indirectement par transfert du bassin versant, certaines perturbations trophiques peuvent impacter les plans d'eau (liées par exemple aux effluents de refuge et aux reposoirs à bétail à proximité des lacs de montagne, ou à la fertilisation agricole en plaine), souvent concomitantes avec l'introduction de pollutions chimiques (apports par lessivage de produits phytosanitaires, transferts de microplastiques…).

©V. Bertrin - Lac de Parentis-Biscarrosse

DES IMPACTS CUMULÉS : L'EXEMPLE DES RETENUES

La Nouvelle-Aquitaine, tout comme les autres régions françaises a vu la création de nombreuses retenues d'eau au cours de ces 40 dernières années que ce soit en tête de bassin versant, en domaine de socle en particulier, ou bien plus en aval en contexte de bassin sédimentaire. Ces retenues, de typologies et d'usages très différents et variés, peuvent être installées sur cours d'eau ou bien déconnectées du réseau hydrographique et dans ces cas, alimentées par pompages en rivière, en nappe ou bien tout simplement par les eaux de ruissellement (**Figure 20**).

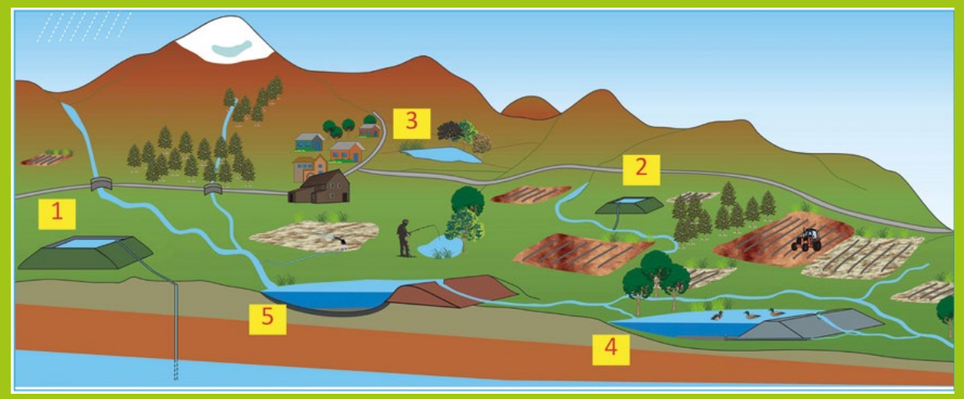


Figure 20 : *Emplacement des retenues selon leur type d'alimentation (201).*
1. Réserve alimentée par pompage dans la nappe.
2. Réserve alimentée par pompage dans la rivière.
3. Retenue collinaire alimentée par ruissellement. Déconnectée du réseau hydrographique.
4. Retenue en dérivation.
5. Retenue en barrage sur cours d'eau.

La création des retenues d'eau pose différentes questions et notamment concernant leurs incidences sur le milieu aquatique, et ce d'autant plus dans les bassins versants où ces types d'aménagements sont nombreux et où les ressources en eau sont déjà fortement mobilisées. Ainsi, avec la multiplication de ces retenues, la question de l'impact cumulé de celles-ci sur le milieu se pose et notamment dans un contexte de changement climatique. Devant le besoin des porteurs de projets et des services de l'État qui, dans le cadre d'études réglementaires, doivent pour les premiers prendre en compte l'impact cumulé de retenues dans leur demande d'autorisation ou de déclaration et, pour les seconds, instruire ces dossiers, le Ministère de l'écologie a sollicité une expertise scientifique collective (ESCo) auprès d'INRAE (ex-IRSTEA) en 2014 visant à apporter des éléments sur les incidences cumulées des retenues [202].

Les incidences d'une retenue sont multiples et dépendent de nombreux facteurs qui sont étroitement liés de l'amont vers aval et fonction de la saisonnalité. Les impacts constatés, classés en fonction de l'impact dans la retenue et à l'aval de celle-ci, sont résumés sur la **Figure 21**.

Un des constats principaux qui ressort de cette expertise est le manque de données (pas ou peu de suivi et non exhaustivité de ce suivi) pour évaluer l'influence d'une retenue sur le milieu aquatique et donc plus globalement de l'effet cumulé. Ainsi, la connaissance sur le fonctionnement hydro(géo)logique à l'échelle d'une retenue reste souvent très limitée et conduit généralement à des incertitudes sur le bilan hydrique en particulier en fonction des méthodes utilisées. Concernant les effets cumulés d'un ensemble de retenues, ils n'ont que rarement fait l'objet de recherche (excepté en hydrologie et pour des retenues essentiellement en cours d'eau), et si c'est le cas, ces études sont pour la plupart restées très cloisonnées en matière de domaines de recherche sans que les différentes approches ne soient croisées. Afin de compléter l'étude décrite ci-dessus, la littérature scientifique concernant les plans d'eau « naturels » a également été collectée, toutefois il ressort de l'ensemble de ces travaux qu'ils sont pour la plupart de « *nature conceptuelle* » et le « *plus souvent méthodologique* ».

Du fait des nombreuses retenues sur le territoire de la Nouvelle-Aquitaine, l'ensemble de ces impacts est donc envisageable avec des degrés différents selon les secteurs, et ce des têtes de bassins versants jusqu'à l'exutoire qu'est l'Océan Atlantique. Toutefois, il n'existe pas d'analyse de l'ensemble de ces effets cumulés que ce soit à l'échelle locale ou bien à l'échelle régionale. Il existe néanmoins quelques études qui ont permis d'approcher l'impact d'un ensemble de réserves de substitution déjà actives et de futures réserves de substitution, déconnectées du milieu naturel et imperméabilisées, sur le territoire de l'ex. Poitou-Charentes et appelées localement « *bassines* ». C'est notamment le cas dans le cadre de l'étude d'impact pour la demande d'autorisation unique de prélèvements pour l'Établissement Public du Marais Poitevin (EPMP) et pour l'Organisme

Unique de Gestion Collective (OUGC), dont le périmètre d'action sur l'ensemble du bassin du Marais Poitevin se localise notamment sur les départements des Deux-Sèvres et de la Charente-Maritime [203].

Rappelons que, du point de vue hydro-climatique, le changement climatique se caractérise par plusieurs effets et impacts environnementaux, dont les augmentations des températures atmosphériques, des eaux de surface, et du potentiel évaporatoire de l'atmosphère, ainsi que par une modification des régimes de précipitation (cf. paragraphe 3.1). La cascade de modifications aura des incidences sur l'apport en eau, sur les eaux superficielles et les eaux souterraines et induira une modification de la disponibilité des eaux superficielles et souterraines pour les différents usages traditionnels. La baisse de la disponibilité en eau (capacité du milieu à répondre aux besoins en eaux en un lieu et à un temps donné) pourrait coïncider avec une augmentation éventuelle des besoins pour satisfaire les différents usages. Le mix-hydrique incluant le stockage hivernal par les retenues de surface devrait permettre l'émergence de solutions d'adaptation, au risque de réduction des disponibilités en eau sous l'effet du changement climatique. Dans le contexte de l'adaptation au changement climatique, il est donc nécessaire de considérer à la fois les effets cumulés négatifs des retenues, qui risquent de s'accroître dans le futur et d'impacter d'autant plus ces milieux aquatiques et leurs usages.

Position par rapport au barrage	Catégorie d'impact	Impact
Amont (dans la retenue)	Impact du 1er ordre	Modification du régime thermique, risque de désoxygénation
		Accumulation de sédiment dans le réservoir, inondation des sols
		Changement des caractéristiques physico–chimiques de l'eau
	Impact du 2e ordre	Eau souterraine autour du réservoir
		Plancton et périphyton
		Croissance de macrophytes aquatiques risque eutrophisation
		Végétation riparienne
	Impact du 3e ordre	Invertébrés, poissons, oiseaux et mammifères
Aval	Impact du 1er ordre	Débits journaliers, saisonniers et annuels
		Flux de sédiments réduits
		Évolution de la morphologie du chenal, de la plaine d'inondation et du delta côtier
		Nappe souterraine dans la zone riparienne
		Température de l'eau, pollution thermique
		Formation de glace
	Impact du 2e ordre	Plancton et périphyton
		Croissance de macrophytes aquatiques
		Végétation riparienne
		Flux de carbone, distorsion du cycle
	Impact du 3e ordre	Invertébrés, poissons, oiseaux et mammifères
		Impacts estuariens
		Impacts marins

Figure 21 : *Différents types d'impacts dans et à l'aval de la retenue - impact immédiat « 1er ordre » qui en influence d'autres en cascade, impacts de 2e et 3e ordre - (Carluer et al. (202) d'après Bergkamp et al. (204)).*

Conclusions

La Région Nouvelle-Aquitaine abrite, du fait notamment de son étendue et de la diversité de ses milieux, un grand nombre d'écosystèmes aquatiques. Cette variété s'explique par les caractéristiques naturelles comme la géologie, le climat, la géomorphologie, la topographie, la pédologie ou encore la biogéographie, et par les usages et productions passés et présents des plans d'eau. Ces plans d'eau fournissent de nombreux services écosystémiques, allant du support à la vie (à travers la production primaire et la biodiversité, ainsi que le maintien des grands cycles biogéochimiques et de l'eau), de la régulation (fonction d'épuration des nutriments, régulation des inondations), d'approvisionnement (support des réseaux trophiques, production d'énergie hydroélectrique) et socio-culturels (loisirs, tourisme, bien-être).

Dans cet ouvrage nous avons souhaité illustrer, de manière la plus large possible, la variété des systèmes lentiques présents en Nouvelle-Aquitaine et des études qui les ont eus pour objet, tout en mettant en évidence les lacunes de connaissance. Aussi, nous souhaitons porter l'attention sur le fait que ces plans d'eau sont des systèmes fragiles et en constante évolution : les activités humaines liées aux usages, ainsi que le changement climatique en cours constituent des menaces concrètes, qui pourraient induire un changement de fonctionnement ou une perte de plusieurs services dans un futur immédiat. Premièrement, toute modification des flux de nutriments et matériaux solides issus du bassin versant liée au changement des températures, des régimes de précipitation ou des pratiques agricoles, aurait un impact sur les rythmes d'eutrophisation des plans d'eau. Dans ce contexte, il faudra intensifier les actions de diminution de la pression agricole dans les bassins versants, afin de baisser les charges de nutriments arrivant en excès. Deuxièmement, les communautés biologiques lacustres néo-aquitaines présentent une grande hétérogénéité liée à la diversité des environnements/biotopes présents, depuis les lacs de haute montagne, naturellement oligotrophes et apiscicoles, jusqu'aux lacs et étangs de la plaine sableuse, en passant par les lacs et retenues de moyenne montagne. En modifiant la présence, le développement, ou le comportement de quelques espèces seulement, le changement climatique a des répercussions en cascade sur tout l'écosystème, car les espèces sont toutes interdépendantes. Il est impératif donc de préserver les habitats naturels prioritairement, pour favoriser le plus possible le maintien des communautés biologiques déjà en place face aux changements globaux. Troisièmement, l'altération des flux hydriques, causée par différents usages, peut générer des impacts au niveau de la quantité d'eau disponible pour la vie des organismes biologiques et les fonctions écosystémiques, donnant lieu de surcroit à des conflits d'usages. Il est nécessaire donc de continuer à développer des approches et des outils adaptés, pour préserver la ressource en eau de tout usage qui ne prenne pas en compte les impacts indirects sur le système lacustre et le réseau hydrographique associé.

Bibliographie

[1] Dussart B., 1992. *Limnologie, l'étude des eaux continentales*. Paris, Boubée, 681 p.

[2] Bartout P., Touchart L., 2016, La notion de limnicité est-elle suffisante pour caractériser l'empreinte spatiale et sociétale des plans d'eau ?, *Revue géographique de l'Est* vol. 56, n°1-2.

[3] Le Parlement Européen et le Conseil de l'Union Européenne, 2000. 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, *Journal officiel des Communautés européennes*, 22.12.2000, L 327, pp. 1-72.

[4] Marache C., 2007. Un nouveau visage pour la Double: l'assainissement et le désenclavement d'une région humide méconnue au XIXe siècle, Aestuaria, Les zones humides européennes : espaces productifs d'hier et d'aujourd'hui, Coll. Histoire et terres humides, 507, pp. : 207-223.

[5] Benarrous R., Marinval M-C., 2003. Carpes et zones d'étangs, des histoires étroitement liées, *Zones Humides Infos*, pp. : 3-4.

[6] CREN Aquitaine, 2008. Inventaires des lagunes de Gironde. 83 p.

[7] Corbier P., Bonneau C.A., 2015. Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des lagunes landaises. Rapport final. BRGM/RP-64633-FR, 98 p., 96ill., 2ann

[8] Perpillou A., 1940. Le Limousin, étude de géographie physique régionale, Chartres : Impr. Durand, 257 p.

[9] Bartout P., 2012. Les étangs du Limousin : des zones humides face au développement durable. Brive-la-Gaillarde : Les Monédières, 250 p. + annexes.

[10] Carlini M., 2006. *Morphologie et hydrodynamique des plans d'eau : le cas des étangs-lacs en Limousin.* Université de Limoges, thèse de doctorat en géographie, 357 p.

[11] Bartout P., 2015. *Les territoires limniques. Nouveau concept limnologique pour une gestion géographique des milieux lentiques*, Orléans, HDR de Géographie, Université d'Orléans, 444 p.

[12] Gardaix J., 2012. *Qualité des eaux des lacs de Carcans-Hourtin et de Lacanau - Étude des paramètres azote et phosphore* – résultats d'analyses, rapport de post-doctorat, Université De Bordeaux 3,60 p.

[13] Bartout P., Touchart L., 2017. Le territoire limnique, une alternative à la gouvernance des plans d'eau par masses d'eau ?, *VertigO – la revue électronique en sciences de l'environnement*, 17(3), 32 p.

[14] Touchart L., Bartout P., 2018. Le limnosystème est-il un concept géographique ?, *Annales de Géographie*, 719, pp. 29-58.

[15] Clevenot, L., 2020. *Bassins autoroutiers et amphibiens en France : des fonctionnalités écologiques aux pratiques de gestion. Approche géographique d'un complexe socio-écologique*. Géographie. Université Paris 1 - Panthéon Sorbonne ; Ladyss UMR CNRS 7533. 365 p.

[16] Baran, P., Basilico, L., Larinier, M., Rigaud, C., Travade, F., 2012. *Management plan to save the eel. Optimising the design and management of installations.* Meeting Recap. ONEMA. ISBN 979 10 91047 10 4.

[17] Drouineau, H., Rigaud, C., Laharanne, A., Fabre, R., Alric, A., Baran, P., 2015. Assessing the efficiency of an elver ladder using a multi state mark–recapture model. *River Research and Applications*, 31(3), pp. 291-300.

[18] Banas D, Le Cor F, Gaillard J., Dufour V., Iuretig A., Hartmeyer P., Soligot-Hognon C., Slaby S., 2020. L'étang piscicole de barrage sur la balance : l'abattement et la contamination des eaux par les étangs est-il un service de poids ?, *Dynamiques Environnementales*, 45, pp. 207-217.

[19] Ibarra, A. A., Lim, P., & Lek, S., 2005. Fish diversity conservation and river restoration in southwest France: a review. *Modelling community structure in freshwater ecosystems*, pp. 64-75.

[20] Meybeck M., 1995, Les lacs et leur bassin, in Pourriot R., Meybeck M., Dir., *Limnologie Générale.* Paris, Masson, 956 pp. : 6-59.

[21] Touchart L., 2002. *Limnologie physique et dynamique, une géographie des lacs et des étangs.* Paris, L'Harmattan, 395 p.

[22] Aldomany M., 2017, *L'évaporation dans le bilan hydrologique des étangs du Centre-Ouest de la France (Brenne et Limousin)*, Orléans, Thèse de doctorat en Géographie, Université d'Orléans, 331 p.

[23] Aldonany M., Touchart L., Bartout P., Choffel Q., 2020, Une zone humide perd-elle autant, moins ou davantage d'eau par évapotranspiration qu'un étang par évaporation ? Étude expérimentale en Limousin. *Annales de Géographie*, 129(731), pp. 83-112.

[24] Buquet, D., Anschutz, P., Charbonnier, C., Rapin, A., Sinays, R., Canredon, A., Bujan S., Poirier, D., 2017. Nutrient sequestration in Aquitaine lakes (SW France) limits nutrient flux to the coastal zone. Journal of Sea Research, 130, pp. 24-35. doi: 10.1016/j.seares.2017.04.006

[25] Reid, A.J., Carlson, A.K., Creed, I.F., Eliason, E.J., Gell, P.A., Johnson, P.T., Kidd, K.A., MacCormack, T.J., Olden, J.D., Ormerod, S.J., 2019. Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biological Reviews* 94, pp. 849–873.

[26] Sala, O.E., Chapin, F.S., Armesto, J.J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber-Sanwald, E., Huenneke, L.F., Jackson, R.B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D.M., Mooney, H.A., Oesterheld, M., Poff, N.L., Sykes, M.T., Walker, B.H., Walker, M., Wall, D.H., 2000. Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. *Science* 287, pp. 1770–1774. https://doi.org/10.1126/science.287.5459.1770

[27] Strayer, D.L., Dudgeon, D., 2010. Freshwater biodiversity conservation: recent progress and future challenges. *Journal of the North American Benthological Society* 29, pp. 344–358. https://doi.org/10.1899/08-171.1

[28] Cellamare, M., Morin, S., Coste, M., Haury, J., 2012. Ecological assessment of French Atlantic lakes based on phytoplankton, phytobenthos and macrophytes. *Environmental Monitoring and Assessment* 184, pp. 4685–4708. https://doi.org/10.1007/s10661-011-2295-0

[29] Gacia, E., Ballesteros, E., 1994. Production of Isoetes lacustris in a Pyrenean lake: seasonality and ecological factors involved in the growing period. *Aquatic Botany*, 48(1), pp. 77-89.

[30] Bertrin V., Boutry S., Dutartre A., Jan G., Moreira S., Ribaudo C. *Rôle fonctionnel, dynamiques écologiques et nécessité de gestion des communautés d'isoétides dans les lacs et étangs du littoral aquitain.* In : La chaîne des lacs et étangs du littoral aquitain, édité par L'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Presses Universitaires de Bordeaux, à paraître.

[31] Capdevielle, P., 1985. Observation dans la région des Landes d'algues d'eau douce rares ou nouvelles pour la flore de France. *Cryptogamie : Algologie VI*, pp. 141–170.

[32] Nemcová, Y., Kreidlová, J., Kosová, A., Neustupa, J., 2012. Lakes and pools of Aquitaine region (France) – a biodiversity hotspot of Synurales in Europe. *Nova Hedwigia* 95, pp. 1–24. https://doi.org/10.1127/0029-5035/2012/0036

[33] Denys, G., Dettai, A., Persat, H., Hautecoeur, M., Keith, P., 2014. Morphological and molecular evidence of three species of pikes Esox spp. (Actinopterygii, Esocidae) in France, including the description of a new species. *Comptes Rendus Biologies* 337, pp. 521–534. https://doi.org/10.1016/j.crvi.2014.07.002

[34] Prud'homme F., Durand B., Gire L., Infante-Sanchez M., 2020. *Première synthèse sur la flore et les végétations des lacs des Pyrénées françaises*. Actes del XII Colloquio Internacional de Botanica Pirenaica – Cantabrica - Girona - 3, 4 i 5 de juliol – 2019. pp. 237-264.

[35] Schindler, D.E., Scheuerell, M.D., 2002. Habitat coupling in lake ecosystems. *Oikos* 98, pp. 177–189. https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2002.980201.x

[36] Vadeboncoeur, Y., McIntyre, P.B., Vander Zanden, M.J., 2011. Borders of Biodiversity: Life at the Edge of the World's Large Lakes. *BioScience* 61, pp. 526–537. https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.7.7

[37] Zaharescu, D.G., Burghelea, C.I., Hooda, P.S., Lester, R.N., Palanca-Soler, A., 2016. Small lakes in big landscape: Multi-scale drivers of littoral ecosystem in alpine lakes. *Science of the Total Environment*, 551, pp. 496–505. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.066

[38] Galloway, J.N.; Dentener, F.J.; Capone, D.G.; Boyer, E.W.; Howarth, R.W.; Seitzinger, S.P.; Asner, G.P.; Cleveland, C.C.; Green, P.A.; Holland, E.A.; Karl, D.M.; Michaels, A.F.; Porter, J.H.; Townsend, A.R.; Vorosmarty, C.J., 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 70 (2), pp. 153-226. 10.1007/s10533-004-0370-0

[39] Ruttenberg, K. C. 2014. *The global phosphorus cycle*, p. 499–558. In. D. M. Karl and W. H. Schlesinger [eds.], Treatise on Geochemistry. Elsevier Science.

[40] Falkowski, P.G.; Raven, J.A., 1997. *Aquatic Photosynthesis*. Malden, USA: Blackwell Science, 374 p.

[41] Elser, J.J.; Bracken, M.E.S.; Cleland, E.E.; Gruner, D.S.; Harpole, W.S.; Hillebrand, H.; Ngai, J.T.; Seabloom, E.W.; Shurin, J.B.; Smith, J.E., 2007. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 10 (12), pp. 1135-1142. 10.1111/j.1461-0248.2007.01113.x.

[42] Wetzel, R.G., 2001. *Planktonic communities: zooplankton and their interactions with fish*. In: Limnology: Lake and River Ecosystems (Ed. Wetzel R.G.), Academic Press, New York. Pp. 395–488.

[43] Litchman, E., de Tezanos Pinto, P., Edwards, K.F., Klausmeier, C.A., Kremer, C.T., Thomas, M.K., 2015. Global biogeochemical impacts of phytoplankton: a trait-based perspective. *Journal of Ecology*, 103, pp.1384–1396. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12438.

[44] Ribaudo, C., Anschutz, P., Bertrin, V., Bujan, S., Charbonnier, C., Dehez, J., Eon, M., Ginelli, L., Jan, G., Le Floch, S., Marechal, T., Pierre, M., Poirier, D., Tison-Rosebery, J., 2020. AquaVIT *Quand les plantes aquatiques invasives transcendent les frontières : approche pluridisciplinaire des relations entre espèces, milieux et gestionnaires*. INRAE, UR ETBX ; INRAE UR EABX ; UMR EPOC, 125 p.

[45] Laplace-Treyture, C., Feret, T., 2016. Performance of the Phytoplankton Index for Lakes (IPLAC): A multimetric phytoplankton index to assess the ecological status of water bodies in France. *Ecological Indicators*, 69, pp. 686–698. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.05.025.

[46] Laplace-Treyture, C., Moreira, S., Gogin, S., Pickhahn, L., Eon, M., Jamoneau, A., 2017. *Un système opérationnel de surveillance et d'alerte des proliférations de cyanobactéries : application aux plans d'eau landais.* Sciences Eaux & Territoires Hors série, 6 p. https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2017.HS.06.

[47] Derot, J., Jamoneau, A., Teichert, N., Rosebery, J., Morin, S., Laplace-Treyture, C., 2020. Response of phytoplankton traits to environmental variables in French lakes: New perspectives for bioindication. *Ecological Indicators* 108, 105659. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105659.

[48] Ribaudo C., Jan G., Bertrin V., 2015. *Interactions entre macrophytes et qualité de l'eau : le cas des isoétides et des exotiques dans les lacs aquitains.* Rapport Irstea, EABX, CARMA. 40 pp.

[49] Ribaudo, C., Bertrin, V., Jan, G., Anschutz, P., Abril, G., 2017. Benthic production, respiration and methane oxidation in Lobelia dortmanna lawns. *Hydrobiologia*, 784, pp. 21–34. https://doi.org/10.1007/s10750-016-2848-x.

[50] Palacin-Lizarbe, C., Camarero, L., Hallin, S., Jones, C. M., & Catalan, J., 2020. Denitrification rates in lake sediments of mountains affected by high atmospheric nitrogen deposition. *Scientific reports*, 10(1), pp. 1-9.

[51] Benelli, S., Ribaudo, C., Bertrin, V., Bartoli, M., Fano, E.A., 2020. Effects of macrophytes on potential nitrification and denitrification in oligotrophic lake sediments. *Aquatic Botany*, 167, 103287. https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2020.103287

[52] Ribaudo, C., Tison-Rosebery, J., Buquet, D., Jan, G., Jamoneau, A., Abril, G., Anschutz, P., Bertrin, V., 2018. Invasive aquatic plants as ecosystem engineers in an oligo-mesotrophic shallow lake. *Frontiers in Plant Science*, 871 doi:10.3389/fpls.2018.01781

[53] Ribaudo, C., Tison-Rosebery, J., Buquet, D., Jan, G., Jamoneau, A., Abril, G., Anschutz, P., Bertrin, V., 2021a. Corrigendum: Invasive Aquatic Plants as Ecosystem Engineers in an Oligo-Mesotrophic Shallow Lake. *Frontiers in Plant Science*, 12.

[54] Rota E., Benelli S., Erséus C., Soors J., Bartoli M., 2018, New data and hypotheses on the invasiveness, habitat selection, and ecological role of the limicolous earthworm Sparganophilus tamesis Benham, 1892. *Fundamental and Applied Limnology*, 192: pp. 129 – 136.

[55] Benelli S., 2018. *Hot moments and hot spots of benthic nitrogen cycling along environmental gradients.* Thèse doctorale. Université de Ferrara, Italie

[56] Benelli, S., Bartoli, M., Ribaudo, C., Fano, E.A., 2019. Contrasting effects of an alien worm on benthic N cycling in muddy and sandy sediments. Water, 11(3), 465, doi:10.3390/w11030465

[57] Cloern J.E., 2001. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem, *Marine Ecology Progress Series*, 210, pp. 223–253.

[58] Correll, D.L., 1998. The Role of Phosphorus in the Eutrophication of Receiving Waters: A Review. *Journal of Environmental Quality,* 27, 261. doi:10.2134/jeq1998.00472425002700020004x

[59] Hasler A.D., 1947. Eutrophication of Lakes by Domestic Drainage, *Ecology*, 28, pp. 383–395. doi:10.2307/1931228

[60] Meybeck M., Helmer R., 1989. The quality of rivers: From pristine stage to global pollution, *Global Planetary Change,* 1(4), pp. 283–309.

[61] Smith V.H., Tilman G.D., Nekola J.C., 1999. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems, *Environmental Pollution*, 100, pp. 179–196. doi:10.1016/S0269-7491(99)00091-3

[62] Pinay G., Gascuel C., Menesguen A., Souchon Y., Le Moal M., 2017. *Eutrophisation. Manifestations, causes, conséquences et prédictibilité.* Rapport de l'Expertise scientifique collective. Expertise réalisée à la demande des ministères en charge de l'environnement et de l'agriculture, avec le soutien financier de l'AFB. 148 p.

[63] Scheffer, M., 1990. *Multiplicity of stable states in freshwater systems.* In: Biomanipulation tool for water management (pp. 475-486). Springer, Dordrecht.

[64] Reddy, K.R., Kadlec, R.H., Flaig, E., Gale, P.M., 1999. Phosphorus Retention in Streams and Wetlands: A Review, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology.* 29, pp. 83–146.

[65] Seitzinger, S., Harrison, J.A., Bohlke, J.K., Bouwman, A.F., Lowrance, R., Peterson, B., Tobias, C., Van Drecht, G., 2006. Denitrification across landscapes and waterscapes: A synthesis. *Ecological Applications.* 16, pp. 2064–2090.

[66] Cole, J.J., Prairie Y.T., Caraco N.F., McDowell W.H., Tranvik L.J., Striegl R.G., Duarte C.M., Kortelainen P., Downing J.A., Middelburg J.J., Melack J., 2007. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget, *Ecosystems,* 10(1), pp.171–184.

[67] Abril, G., Borges, A.V., 2019. Ideas and perspectives: Carbon leaks from flooded land: do we need to replumb the inland water active pipe?. *Biogeosciences,* 16(3), pp. 769-784.

[68] Brigault, S., Ruban, V., 2000. External Phosphorus Load Estimates and P-Budget for the Hydroelectric Reservoir of Bort-les-Orgues, France. *Water, Air, & Soil Pollution,* 119, pp. 91–103. https://doi.org/10.1023/A:1005186122618

[69] Righi, D., Wilbert, J., 1984. Les sols sableux podzolisés des Landes de Gascogne (France). Répart. Caractères Principaux Sci Sol 4, 253–254.

[70] Anschutz P., Quenault F., Buquet D., Charbonnier C., Hoffmann F. *Gestion des milieux et qualité des eaux : le cas du territoire des lacs médocains.* In : La chaîne des lacs et étangs du littoral aquitain, édité par L'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Presses Universitaires de Bordeaux, à paraître.

[71] Carstensen M.V., Hashemi F., Hoffmann C.C., Zak D., Audet J., Kronvang B., 2020. Efficiency of mitigation measures targeting nutrient losses from agricultural drainage systems: A review. *Ambio,* 2020, 49, pp. 1820–1837. doi.org/10.1007/s13280-020-01345-5.

[72] Charbonnier C., Anschutz P. *Nouvelles connaissances sur le fonctionnement biogéochimique des grands lacs landais.* In : La chaîne des lacs et étangs du littoral aquitain, édité par L'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Presses Universitaires de Bordeaux, à paraître.

[73] Hammami B., 2020. *Identification des pressions anthropiques sur les bassins versants des lacs littoraux aquitains.* Mémoire de stage INP-ENSAT.

[74] Håkanson L., Jansson M., 1983. *Lake Types and Sediment* Types. In: Principles of Lake Sedimentology. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, p. 531.

[75] Verneaux J., Vidonne A., Remy F., Guyard A., 1991. Particules organiques et rapport C/N des sédiments des lacs du Jura. Annales de Limnologie - *International Journal of Limnology,* 27 (2), pp. 175-190.

[76] Labat F., Thiébaut G., Piscart C., 2021. Principal Determinants of Aquatic Macrophyte Communities in Least-Impacted Small Shallow Lakes in France. *Water,* 13 (5), p. 609.

[77] Beaune D., Sellier Y., Luquet G., Grandjean F., 2018. Freshwater acidification: an example of an endangered crayfish species sensitive to pH. *Hydrobiologia,* 813 (1), pp. 41-50.

[78] Heathwaite A.L., 1993. Disappearing Peat-Regenerating Peat? The Impact of Climate Change on British Peatlands. *The Geographical Journal,* 159 (2), p. 203.

[79] Dutartre A., Laplace-Treyture C., Bertrin V., Madigou C., 2006. Suivi des communautés de macrophytes de l'étang d'Aureilhan (Landes) en relation avec le dragage du plan d'eau : campagne de juillet 2006. Irstea, 10 p.

[80] Capdevielle, P. 1979. *Recherches écologiques et systématiques sur le phytoplancton du lac de Cazaux - Sanguinet - Biscarrosse.* Annales de la Station Biologique de Besse-en-Chandesse 12, pp. 1-304.

[81] Hurrell J. W., Kushnir Y., Visbeck, M., 2001. The North Atlantic Oscillation. Science, American. *Association for the Advancement of Science,* 291, pp. 603-605

[82] Norrman, J. O., 1964. *Lake Vättern: investigations on shore and bottom morphology.* Geografiska Annaler, Taylor & Francis, 46, pp. 1-238.

[83] Charles, E., Idier, D., Delecluse, P., Déqué, M., Le Cozannet, G., 2012. Climate change impact on waves in the Bay of Biscay, France. *Ocean Dynamics,* Springer-Verlag, 62, pp. 831-848.

[84] Bertrin V., Boutry S., Jan G., Ducasse G., Grigoletto F., Ribaudo C., 2017. Effects of wind-induced sediment resuspension on distribution and morphological traits of aquatic weeds in shallow lakes. *Journal of Limnology,* 76, pp. 84-96.

[85] Bertrin V., Boutry S., Alard D., Haury J., Jan G., Moreira S., Ribaudo, C., 2018. Prediction of macrophyte distribution: The role of natural versus anthropogenic physical disturbances. *Applied Vegetation Science,* 21, pp. 395-410.

[86] Ribaudo, C., Tison-Rosebery, J., Eon, M., Jan, G., Bertrin, V., 2021b. Wind Exposure Regulates Water Oxygenation in Densely Vegetated Shallow Lakes. *Plants,* 10(7), 1269.

[87] Scheffer, M., 2004. *Ecology of shallow lakes.* Kluwer Academic Publishers. 357 p. 10.1007/978-1-4020-3154-0.

[88] Håkanson, L., 1977. The influence of wind, fetch, and water depth on the distribution of sediments in Lake Vänern, Sweden. *Canadian Journal of Earth Sciences,* NRC Research Press, 14, pp. 397-412.

[89] Savy B., Touchart L., 2003. Les lacs à déstratificateur thermique et le cas de Mas Chaban (Charente, France). *Revue de Géographie Alpine,* 91(1), pp. 81-91.

[90] Touchart L., 2007. *L'étang et la température de l'eau : un ensemble d'impacts géographiques.* In: Géographie de l'étang, des théories globales aux pratiques locales. Paris, L'Harmattan, pp. 119-156.

[91] Touchart L., 2016. Le bilan thermique des étangs : réflexions épistémologiques et application aux étangs limousins. *Annales de Géographie,* 125(708), pp. 143-169.

[92] Choffel Q., Touchart L., Bartout P., Al Domany M., 2018, Le centre thermique, nouvel outil de compréhension du bilan thermique et de l'évolution spatio-temporelle de la température d'un étang. *Norois,* numéro spécial « Eaux, marais, lac, étang, pêche », 246(1), pp. 57-73.

[93] Lewis W.M. Jr., 1983. A revised classification of lakes based on mixing. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,* 40, pp. 1779-1787.

[94] Denny, M., 1988. *Biology and the mechanics of the wave-swept environment.* Princeton University Press, 344 p.

[95] Keddy, P. A., 1985. Wave disturbance on lakeshores and the within-lake distribution of Ontario's Atlantic coastal plain flora. *Canadian Journal of Botany,* 63, pp. 656-660

[96] Schutten, J., Dainty, J., Davy, A., 2004. Wave-induced Hydraulic Forces on Submerged Aquatic Plants in Shallow Lakes. *Annals of Botany,* 93, pp. 333-341.

[97] Spierenburg, P.; Lucassen, E.C.H.E.T., Pulido, C.; Smolders, A.J.P., Roelofs, J.G.M., 2013. Massive uprooting of *Littorella uniflora* (L.) Asch. during a storm event and its relation to sediment and plant characteristics. Plant Biology, 15, pp. 955-962.

[98] Puijalon, S.; Bornette, G., Sagnes, P., 2005. Adaptations to increasing hydraulic stress: morphology, hydrodynamics and fitness of two higher aquatic plant species. *Journal of Experimental Botany,* 56, 777.

[99] Puijalon, S. & Bornette, G., 2006. Phenotypic plasticity and mechanical stress: biomass partitioning and clonal growth of an aquatic plant species. *American Journal of Botany - Botanical Society of America,* 93, pp. 1090-1099.

[100] Keddy, P. A., 1982. Quantifying within-lake gradients of wave energy: Interrelationships of wave energy, substrate particle size and shoreline plants in axe lake, Ontario. *Aquatic Botany,* 14, pp. 41-58.

[101] Madsen, J. D.; Chambers, P. A.; James, W. F.; Koch, E. W. & Westlake, D. F., 2001. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia,* 444, pp. 71-84.

[102] Van Zuidam, B.G., Peeters, E.T., 2015. Wave forces limit the establishment of submerged macrophytes in large shallow lakes. Limnology and Oceanography, Wiley Online Library, 60, pp. 1536-1549.

[103] Barko, J.W., Gunnison, D., Carpenter, S.R., 1991. Sediment interactions with submersed macrophyte growth and community dynamics. *Aquatic Botany*, 41, pp. 41-65.

[104] Schulz, M., Kozerski, H. P., Pluntke, T., Rinke, K., 2003. The influence of macrophytes on sedimentation and nutrient retention in the lower River Spree (Germany). *Water Research,* 37(3), pp. 569-578.

[105] Le Treut, H. Les impacts du changement climatique en Aquitaine : un état des lieux scientifique, 2013. Pessac : Presses Universitaires de Bordeaux : LGPA-Editions, 365 p. (Dynamiques environnementales, HS 2013).

[106] AcclimaTerra, Le Treut, H. (dir), 2018. Anticiper les changements climatiques en Nouvelle-Aquitaine. Pour agir dans les territoires. Éditions Région Nouvelle-Aquitaine, Éditions Région Nouvelle-Aquitaine, 488 p

[107] IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

[108] Vautard, R., 1990. Multiple weather regimes over the North Atlantic: Analysis of precursors and successors. Monthly Weather Review, 118, pp. 2056–2081.

[109] McVicar Tim R., Roderick Michael L., Donohue Randall J., Li Ling Tao, Van Niel Thomas G., Thomas Axel, Grieser Jürgen, Jhajharia Deepak, Himri Youcef, Mahowald Natalie M., Mescherskaya Anna V., Kruger Andries C., Rehmank Shafiqur, Dinpashoh Yagob, 2012. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *Journal of Hydrology.* Volumes 416–417, 182-205 pp. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.024

[110] Farmer G.T., Cook J., 2013. *Climate change science: a modern synthesis.* Springer, New York, 564 p. ISBN 978-94-007-5756-1, DOI 10.1007/978-94-007-5757-8.

[111] Stockwell J.D., Doubek J.P., Adrian R., Anneville O., Carey C. C., Carvalho L., Domis L.N.D.S., Dur G., Frassl M.A., Grossart H.-P., Ibelings B.W., Lajeunesse M.J., Lewandowska A.M., Llames M.E., Matsuzaki S.-I.S., Nodine, E.R., Nõges P., Patil V.P., Pomati F., Rinke K., Rudstam L.G., Rusak J.A., Salmaso N., Seltmann, C.T., Straile D., Thackeray S.J., Thiery W., Urrutia-Cordero P., Venail P., Verburg P., Woolway R.I., Zohary T., Andersen M.R., Bhattacharya R., Hejzlar J., Janatian N., Kpodonu A.T.N.K., Williamson T.J., Wilson H.L., 2020. Storm impacts on phytoplankton community dynamics in lakes. *Global Change Biology,* 26:2756–84.

[112] Cottingham K.L., Weathers K.C., Ewing H.A., Greer M.L., Carey C.C., 2021. Predicting the effects of climate change on freshwater cyanobacterial blooms requires consideration of the complete cyanobacterial life cycle. *Journal of Plankton Research.* 43, pp. 10–9.

[113] Whitehead P.G., Wilby R.L., Battarbee R.W., Kernan M., Wade A.J., 2009. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal,* 54 (1), pp. 101-123 doi: 10.1623/hysj.54.1.101.

[114] Touchart L., Bartout P., 2010. The influence of monk equipped ponds on the quality of basin head streams, the example of water temperature in Limousin and Berry (France). *Lakes, reservoirs and Ponds, Romanian Journal of Limnology,* 4, pp. 81-108.

[115] Touchart L., Azaroual A., Nedjai R., Bartout P., Aldomany M., Millot C., 2014. The stability of the water column in French ponds (Limousin region) by the calculation of the Wedderburn number. Conference dedicated to the World Meterological Day and the World Water Day, March 21-22, 2014, Universitatea Babeş-Bolyai şi Administrația Bazinală de Apă Someş-Tisa. Proceedings in: Pandi G. and Moldovan F., Ed., Air and water components of the environment. Cluj-Napoca, Casa Cărții de Știință, pp. 8-15, 484 p.

[116] Carlini M., 2006, Morphologie et hydrodynamique des plans d'eau : le cas des étangs-lacs en Limousin, Limoges : Thèse de doctorat en géographie, Université de Limoges, 357 p.

[117] Hayashi M. & Rosenberry D. O., 2002. Effects of ground water exchange on the hydrology and ecology of surface water. Groundwater, 40(3), 309-316.

[118] IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.

[119] Smerdon B.D., Devito K.J., Mendoza C.A., 2005. Interaction of groundwater and shallow lakes on outwash sediments in the sub-humid Boreal Plains of Canada. *Journal of Hydrology,* 314(1-4), pp. 246-262.

[120] Furey P.C., Nordin R.N., Mazumder A., 2004. Water level drawdown affects physical and biogeochemical properties of littoral sediments of a reservoir and a natural lake. *Lake and Reservoir Management,* 20(4), pp. 280-295.

[121] Martinsen K.T., Kragh T., Sand-Jensen K., 2019. Carbon dioxide fluxes of air-exposed sediments and desiccating ponds. *Biogeochemistry,* pp. 1-16.

[122] Augusto L., Badeau V., Arrouays D., Trichet P., Flot J. L., Jolivet C., Merzeau D., 2006. Caractérisation physico-chimique des sols à l'échelle d'une région naturelle à partir d'une compilation de données. Exemple des sols du massif forestier landais, *Étude et gestion des sols,* 13, pp. 7-22.

[123] Canton M., Anschutz P., Coynel A., Polsenaere P., Auby I., Poirier D., 2012. Nutrient export to an Eastern Atlantic coastal zone: first modeling and nitrogen mass balance. *Biogeochemistry,* 107 : 361–377. doi:10.1007/s10533-010-9558-7

[124] Jankowski T., Livingstone D.M., Bührer H., Forster R., Niederhauser P., 2006. Consequences of the 2003 European heat wave for lake temperature profiles, thermal stability, and hypolimnetic oxygen depletion: Implications for a warmer world, *Limnology and Oceanography,* 51, pp. 815–819. doi:10.4319/lo.2006.51.2.0815

[125] Rapin, A., Rabiet, M., Mourier, B., Grybos, M., Deluchat, V., 2020. Sedimentary phosphorus accumulation and distribution in the continuum of three cascade dams (creuse river, france). *Environmental Science and Pollution Research,* 27(6), pp. 6526-6539. doi:10.1007/s11356-019-07184-6.

[126] Nguyen, D. N., Grybos, M., Rabiet, M., Deluchat, V., 2020. How do colloid separation and sediment storage methods affect water-mobilizable colloids and phosphorus? An insight into dam reservoir sediment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,* 606 doi:10.1016/j.colsurfa.2020.125505.

[127] Jeppesen E., Meerhoff M., Holmgren K., González-Bergonzoni I., Mello F.T., Declerck S.A.J., Meester L.D., Søndergaard M., Lauridsen T.L., Bjerring R., Conde-Porcuna J.M., Mazzeo N., Iglesias C., Reizenstein M., Malmquist H.J., Liu Z., Balayla D., Lazzaro X., 2010. Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential effects on ecosystem function, *Hydrobiologia,* 646, pp. 73–90. doi:10.1007/s10750-010-0171-5.

[128] Moss B., Kosten S., Meerhof M., Battarbee R., Jeppesen E., Mazzeo N., Havens K., Lacerot G., Liu Z., De Meester L., 2011. Allied attack: climate change and eutrophication, *Inland Waters,* 1, pp. 101–105.

[129] Jeppesen, E.; Kronvang, B.; Meerhoff, M.; Søndergaard, M.; Hansen, K.M.; Andersen, H.E.; Lauridsen, T.L.; Liboriussen, L.; Beklioglu, M.; Özen, A., 2009. Climate change effects on runoff, catchment phosphorus loading and lake ecological state, and potential adaptations. *Journal of Environmental Quality,* 38 (5), pp. 1930-1941.

[130] Gomez E., Millet B., Picot B., 1998. Accumulation des sels nutritifs dans un sédiment lagunaire et environnement hydrodynamique, *Oceanologica* Acta, 21, pp. 805–817. doi:10.1016/S0399-1784(99)80008-5.

[131] Jensen M.H., Lomstein E., Sorensen J., 1990. Benthic NH4+ and NO3- flux following sedimentation of a spring phytoplankton bloom in Aarhus Bight, Denmark, Marine Ecology Progress Series, 61, pp. 87–96.

[132] Jeppesen E., Søndergaard M., Jensen J.P., Havens K.E., Anneville O., Carvalho L., Coveney M.F., Deneke R., Dokulil M.T., Foy B., Gerdeaux D., Hampton S.E., Hilt S., Kangur K., Köhler J., Lammens E.H. h. r., Lauridsen T.L., Manca M., Miracle M.R., Moss B., Nõges P., Persson G., Phillips G., Portielje R., Romo S., Schelske C.L., Straile D., Tatrai I., Willén E., Winder M., 2005. Lake responses to reduced nutrient loading – an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies, *Freshwater Biology,* 50, pp. 1747–1771. doi:10.1111/j.1365-2427.2005.01415.x.

[133] Kaste Ø., Dillon P.J., 2003. Inorganic nitrogen retention in acid-sensitive lakes in southern Norway and southern Ontario, Canada—a comparison of mass balance data with an empirical N retention model, *Hydrology Processes,* 17, pp. 2393–2407. doi:10.1002/hyp.1249

[134] Windolf J., Jeppesen E., Jensen J.P., Kristensen P., 1996. Modelling of seasonal variation in nitrogen retention and in-lake concentration: A four-year mass balance study in 16 shallow Danish lakes, *Biogeochemistry,* 33, pp. 25–44. doi:10.1007/BF00000968

[135] Cook P.L.M., Aldridge K.T., Lamontagne S., Brookes J.D., 2010. Retention of nitrogen, phosphorus and silicon in a large semi-arid riverine lake system, *Biogeochemistry,* 99, pp. 49–63. doi:10.1007/s10533-009-9389-6

[136] Özen A., Karapınar B., Kucuk İ., Jeppesen E., Beklioglu M., 2010. Drought-induced changes in nutrient concentrations and retention in two shallow Mediterranean lakes subjected to different degrees of management, *Hydrobiologia,* 646, pp. 61–72. doi:10.1007/s10750-010-0179-x

[137] Romero J.R., Kagalou I., Imberger J., Hela D., Kotti M., Bartzokas A., Albanis T., Evmirides N., Karkabounas S., Papagiannis J., Bithava A., 2002. Seasonal water quality of shallow and eutrophic Lake Pamvotis, Greece: implications for restoration, *Hydrobiologia,* 474, pp. 91–105. doi:10.1023/A:1016569124312

[138] Meybeck, M., 1982. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers, *American Journal of Science.*, 282, pp. 401-450.

[139] Jöhnk K.D., Huisman J., Sharples J., Sommeijer B., Visser P.M., Stroom J.M., 2008. Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria. *Global Change Biology,* 14 (3), pp. 495-512, doi : 10.1111/j.1365-2486.2007.01510.x.

[140] Dale B., Edwards M., Reid P., 2006. *Climate Change and Harmful Algal Blooms.* In: Ecol. Harmful Algae, pp. 367-378. doi : 10.1007/978-3-540-32210-8_28.

[141] Sommaruga-Wögrath S., Koinig K. A., Schmidt R., Sommaruga R., Tessadri R., Psenner R., 1997. Temperature effects on the acidity of remote alpine lakes. *Nature,* 387 (6628), pp. 64-67, doi : 10.1038/387064a0.

[142] Strang D., Aherne J., 2015. Potential Influence of Climate Change on the Acid-Sensitivity of High-Elevation Lakes in the Georgia Basin, British Columbia. *Advances in Meteorology,* e536892 doi : 10.1155/2015/536892.

[143] George G., Hurley M., Hewitt D., 2007. The impact of climate change on the physical characteristics of the larger lakes in the English Lake District. *Freshwater Biology,* 52 (9), 1647-1666 doi : 10.1111/j.1365-2427.2007.01773.x.

[144] Stanichnaya R., Stanichny S., Ratner Y., Shokurov M., Soloviev D., Burdyugov V., 2010. Wind impact on the Black Sea ecosystem. Vienna, Austria.

[145] Cellamare, M., Leitao, M., Coste, M., Dutartre, A., Haury, J., 2010. Tropical phytoplankton taxa in Aquitaine lakes (France). *Hydrobiologia.* 639, pp. 129–45.

[146] Anses, 2020. Évaluation des risques liés aux cyanobactéries et leurs toxines dans les eaux douces. Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective, 438 p.

[147] Pitois F., Thoraval I., Baures E., Thomas O., 2014. Geographical Patterns in Cyanobacteria Distribution: Climate Influence at Regional Scale. *Toxins.* 6, pp. 509–22.

[148] Chorus I., Welker M. (Eds.), 2021. *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management.* Second edition. CRC Press, an imprint of Informa, Boca Rataon. 839 p.

[149] Mitroi V., Deroubaix J.-F., Vinçon-Leite B., Catherine A., Maleval V., Humbert J.-F., 2016. Évaluation de la qualité des plans d'eau urbains et périurbains : apport des approches transdisciplinaires et régionalisées. *Natures Sciences Sociétés.* Vol. 24, pp. 203–16.

[150] Davey, C.M., Chamberlain, D.E., Newson, S.E., Noble, D.G., Johnston, A., 2012. Rise of the generalists: evidence for climate driven homogenization in avian communities. *Global Ecology and Biogeography,* 21, pp. 568–578. https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00693.x

[151] Jeppesen, E., Mehner, T., Winfield, I.J., Kangur, K., Sarvala, J., Gerdeaux, D., Rask, M., Malmquist, H.J., Holmgren, K., Volta, P., Romo, S., Eckmann, R., Sandström, A., Blanco, S., Kangur, A., Ragnarsson Stabo, H., Tarvainen, M., Ventelä, A.-M., Søndergaard, M., Lauridsen, T.L., Meerhoff, M., 2012. Impacts of climate warming on the long-term dynamics of key fish species in 24 European lakes. *Hydrobiologia* 694, pp. 1–39. https://doi.org/10.1007/s10750-012-1182-1

[152] Sgrò, C.M., Lowe, A.J., Hoffmann, A.A., 2011. Building evolutionary resilience for conserving biodiversity under climate change. *Evolutionary Applications,* 4, 326–337. https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2010.00157.x

[153] Nogués-Bravo, D., Rodríguez-Sánchez, F., Orsini, L., de Boer, E., Jansson, R., Morlon, H., Fordham, D.A., Jackson, S.T., 2018. Cracking the Code of Biodiversity Responses to Past Climate Change. *Trends in Ecology & Evolution,* 33, 765–776. https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.07.005.

[154] Bameul, F., 1994. Les Coléoptères aquatiques des Marais de la Perge (Gironde), témoins de la fin des temps glaciaires en Aquitaine. *Bulletin de la Société entomologique de France*, 99, pp. 301–321.

[155] Rosset V., Oertli B., 2011. Freshwater biodiversity under climate warming pressure: Identifying the winners and losers in temperate standing waterbodies. *Biological Conservation,* 144 (9), pp. 2311 2319 doi : 10.1016/j.biocon.2011.06.009.

[156] Bameul, F., 1985. Les Gyrinus de la faune de France (Col. Gyrinidae). *L'Entomologiste* (Paris) 41, pp. 191–199.

[157] Grand, D., 2002. Sur la distribution en Gascogne de Leucorrhinia albifrons (Burmeister, 1840) (Odonata, Anisoptères, Libellulidae). *Martinia* 18, pp. 147–152.

[158] Prud'homme F., Blanc F., Gouix N., Osorio V., Rollet S., Ventura M., Jupille O., (In press). Biodiversité des lacs des Pyrénées : améliorer les connaissances pour une gestion conservatoire. *Dynamiques environnementales*, 43, à paraître.

[159] Rennie M.D., Jackson L.J., 2005. The influence of habitat complexity on littoral invertebrate distributions: patterns differ in shallow prairie lakes with and without fish. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,* 62 (9), pp. 2088 2099.

[160] Petitjean, S., Versanne-Janodet, S., Mas, M., Comby, A., Sourisseau, E., Dumas, J., 2017. Atlas des poissons du Limousin. Historique, évolution, répartition, Agence Française pour la Biodiversité-Fédération de la Corrèze pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique-Fédération de la Creuse pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique-Fédération de la Haute-Vienne pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique-Maison de l'Eau et de la Pêche de la Corrèze. ed. Tulle.

[161] Gardner, J.L., Peters, A., Kearney, M.R., Joseph, L., Heinsohn, R., 2011. Declining body size: a third universal response to warming? *Trends in Ecology & Evolution,* 26, pp. 285–291. https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.03.005

[162] Daufresne, M., Lengfellner, K., Sommer, U., 2009. Global warming benefits the small in aquatic ecosystems. PNAS 106, pp. 12788–12793. https://doi.org/10.1073/pnas.0902080106

[163] Petchey, O.L., McPhearson, P.T., Casey, T.M., Morin, P.J., 1999. Environmental warming alters food-web structure and ecosystem function. *Nature,* pp. 402, 69–72. https://doi.org/10.1038/47023.

[164] Sentis, A., Binzer, A., Boukal, D.S., 2017. Temperature-size responses alter food chain persistence across environmental gradients. *Ecology Letters,* 20, pp. 852–862. https://doi.org/10.1111/ele.12779.

[165] Cellamare, M., Pinto, P. de T., Leitão, M., Coste, M., Boutry, S., Haury, J., 2013. Using functional ap-

proaches to study phytoplankton communities in a temperate region exposed to tropical species dispersal. *Hydrobiologia,* pp. 702, 267–282. https://doi.org/10.1007/s10750-012-1330-7.

[166] Tseng, M., Filippo, C.M.D., Fung, M., Kim, J.O., Forster, I.P., Zhou, Y., 2021. Cascading effects of algal warming in a freshwater community. *Functional Ecology,* 35, pp. 920–929. https://doi.org/10.1111/1365-2435.13752.

[167] Neury-Ormanni, J., 2019. *Impact de la saisonnalité et d'une contamination pesticide environnementale sur des relations biotiques entre la micro-méiofaune et les microalgues d'un biofilm d'eau douce.* Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, Bordeaux, 208 p.

[168] Rabinowitz, D., 1981. *Seven forms of rarity,* in: Synge, H. (Ed.), The Biological Aspects of Rare Plants Conservation. pp. 205–217.

[169] Maciel, E.A., 2021. An index for assessing the rare species of a community. *Ecological Indicators* 124, 107424. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107424.

[170] Thurman, L.L., Stein, B.A., Beever, E.A., Foden, W., Geange, S.R., Green, N., Gross, J.E., Lawrence, D.J., LeDee, O., Olden, J.D., Thompson, L.M., Young, B.E., 2020. Persist in place or shift in space? Evaluating the adaptive capacity of species to climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment,* 18, pp. 520–528. https://doi.org/10.1002/fee.2253.

[171] Mallard F. (coord.), 2020. Programme les sentinelles du climat – *Tome IX : Connaitre et comprendre pour protéger les espèces animales et végétales face au changement climatique,* C. Nature : Le Haillan, Gironde, 822p.

[172] Mallard, F., Couderchet, L., 2019. *Climate sentinels research program: developing indicators of the effects of climate change on biodiversity in the region of New Aquitaine (south west, France).* In: Handbook of climate change and biodiversity, pp. 223-241. Springer, Cham.

[173] Dutartre, A., 1978. *Végétation aquatique. Plantes exotiques du Sud-Ouest. Répartition actuelle et risques d'extension.* CTGREF, Groupement de Bordeaux, Division Qualité des Eaux. Compte Rendu N° 45, 24 p.

[174] Ribaudo, C., Dutartre, A., Bertrin, V. *50 ans d'hydrophytes invasives dans les grands lacs du littoral aquitain : où en sommes-nous ?* In : La chaîne des lacs et étangs du littoral aquitain, édité par L'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Presses Universitaires de Bordeaux, à paraître.

[175] Thiébaut, G., Gillard, M., Deleu, C., 2016. Growth, regeneration and colonisation of Egeria densa fragments: the effect of autumn temperature increases. *Aquatic Ecology,* 50, pp. 175–185. https://doi.org/10.1007/s10452-016-9566-3.

[176] Silveira, M.J., Thiébaut, G., 2017. Impact of climate warming on plant growth varied according to the season. *Limnologica,* 65, pp. 4–9. https://doi.org/10.1016/j.limno.2017.05.003.

[177] Cellamare, M., Leitão, M., Coste, M., Dutartre, A., Haury, J., 2009. Tropical phytoplankton taxa in Aquitaine lakes (France). *Hydrobiologia,* 639, pp. 129–145. https://doi.org/10.1007/s10750-009-0029-x.

[178] Nentwig, W., Bacher, S., Kumschick, S., Pyšek, P., Vilà, M., 2018. More than "100 worst" alien species in Europe. *Biological Invasions,* 20, pp. 1611–1621. https://doi.org/10.1007/s10530-017-1651-6.

[179] Twardochleb, L.A., Olden, J.D., Larson, E.R., 2013. A global meta-analysis of the ecological impacts of nonnative crayfish. *Freshwater Science,* 32, pp. 1367–1382. https://doi.org/10.1899/12-203.1.

[180] Correia, A.M., 2003. Food choice by the introduced crayfish *Procambarus clarkii. Annales Zoologici Fennici*, 40, pp. 517–528.

[181] Bameul F., 2013. Disparition de *Graphoderus bilineatus* (Degeer, 1774) (Coleoptera, Dytiscidae) des marais de la Perge causée par l'Ecrevisse américaine à pattes rouges. *Bulletin de la Société Entomologique de France,* 118 (2), pp. 133-136.

[182] Rodríguez-Pérez, H., Hilaire, S., Mesléard, F., 2016. Temporary pond ecosystem functioning shifts mediated by the exotic red swamp crayfish (Procambarus clarkii): a mesocosm study. *Hydrobiologia,* 767, pp. 333–345.

[183] Carreira, B.M., Segurado, P., Laurila, A., Rebelo, R., 2017. Can heat waves change the trophic role of the world's most invasive crayfish? Diet shifts in *Procambarus clarkii.* PLOS ONE 12, e0183108. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183108.

[184] Buisson, L., Grenouillet, G., Villéger, S., Canal, J., Laffaille, P., 2013. Toward a loss of functional diversity in stream fish assemblages under climate change. *Global Change Biology,* 19, pp. 387–400. https://doi.org/10.1111/gcb.12056.

[185] Keck, F., Millet, L., Debroas, D., Etienne, D., Galop, D., Rius, D., Domaizon, I., 2020. Assessing the response of micro-eukaryotic diversity to the Great Acceleration using lake sedimentary DNA. *Nature Communications,* 11, 3831. https://doi.org/10.1038/s41467-020-17682-8.

[186] Monchamp, M.-E., Spaak, P., Domaizon, I., Dubois, N., Bouffard, D., Pomati, F., 2018. Homogenization of lake cyanobacterial communities over a century of climate change and eutrophication. *Nature Ecology and Evolution,* 2, pp. 317–324. https://doi.org/10.1038/s41559-017-0407-0.

[187] Cazelles, K., Bartley, T., Guzzo, M.M., Brice, M.-H., MacDougall, A.S., Bennett, J.R., Esch, E.H., Kadoya, T., Kelly, J., Matsuzaki, S., Nilsson, K.A., McCann, K.S., 2019. Homogenization of freshwater lakes: Recent compositional shifts in fish communities are explained by gamefish movement and not climate change. *Global Change Biology,* 25, 4222–4233. https://doi.org/10.1111/gcb.14829.

[188] Woodward, G., Perkins, D.M., Brown, L.E., 2010. Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization. Philosophical Transactions of the Royal Society B: *Biological Sciences,* 365, pp. 2093–2106. https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0055

[189] Prista, G.A., Agostinho, R.J., Cachão, M.A., 2015. Observing the past to better understand the future: a synthesis of the Neogene climate in Europe and its perspectives on present climate change. *Open Geosciences,* 7(1).

[190] Zhang P., Kuramae A., van Leeuwen C.H.A, Velthuis M., van Donk E., Xu J., Bakker E.S., 2020. Interactive effects of rising temperature and nutrient enrichment on aquatic plant growth, stoichiometry and palatability. *Frontiers in Plant Science,* 11. 00058.

[191] Catalan, J., Pla-Rabés, S., Wolfe, A.P., Smol, J.P., Rühland, K.M., Anderson, N.J., Kopáček, J., Stuchlík, E., Schmidt, R., Koinig, K.A., 2013. Global change revealed by palaeolimnological records from remote lakes: a review. *Journal of Paleolimnology* 49, 513–535.

[192] Catalan, J., Pla, S., Rieradevall, M., Felip, M., Ventura, M., Buchaca, T., Camarero, L., Brancelj, A., Appleby, P.G., Lami, A., Grytnes, J.A., Agustí-Panareda, A., Thompson, R., 2002. Lake Redó ecosystem response to an increasing warming the Pyrenees during the twentieth century. *Journal of Paleolimnology,* 28, pp. 129–145. https://doi.org/10.1023/A:1020380104031.

[193] Vadadi-Fülöp C, Sipkay C, Mészáros G, Hufnagel L., 2012. Climate change and freshwater zooplankton: What does it boil down to? *Aquatic Ecology,* 46, pp. 501-519.

[194] Blottiere L. 2015. *The effects of wind-induced mixing on the structure and functioning of shallow freshwater lakes in a context of global change.* Thèse de Doctorat, Paris-Saclay, 221 p.

[195] Planque, B., Beillois, P., Jégou, A.-M., Lazure, P., Petitgas, P., Puillat, I., 2003. Large-scale hydroclimatic variability in the Bay of Biscay: the 1990s in the context of interdecadal changes. *ICES Marine Science Symposia,* 219, pp. 61-70.

[196] Chancerel F., 2003. Le Brochet - *Biologie et gestion,* Conseil supérieur de la pêche, Fontenay-Sous-Bois, 199 p.

[197] Olson M., Carpenter S., Cunningham P., Gafny S., Herwig B., Nibbelink N., Pellett T., Storlie C., Trebitz A., Wilson K., 1998. Managing Macrophytes to Improve Fish Growth: A Multi-Lake Experiment. *Fisheries,* 23, pp. 6–12.

[198] Adrian R., O'Reilly C. M., Zagarese H., Baines S. B., Hessen D. O., Keller W., Livingstone D. M., Sommaruga R., Straile D., Van Donk E., Weyhenmeyer G. A., Winder M., 2009. Lakes as sentinels of climate change, *Limnology and oceanography,* 54 (6), pp. 2283-2297.

[199] Smolders, A.J.P., Lucassen, E.C.H.E.T., Roelofs, J.G.M., 2002. The isoetid environment: biogeochemistry and threats, *Aquatic Botany,* Acidification and restoration of soft water lakes *and their vegetation,* 73, pp. 325–350. https://doi.org/10.1016/S0304-3770(02)00029-3.

[200] Elder J.-F., Le Doaré J., 2021. État des connaissances sur la distribution d'Anisops sardeus Herrich-Schäffer, 1849 en France (Heteroptera Notonectidae). *L'Entomologiste,* 77 (1), pp. 3-8.

[201] Carluer N., Babut M., Bernez I., Burger-Leenhardt D., Dorioz J. M., Douez O., Dufour S., Grimaldi C., Habets F., Le Bissonais Y., Molénat J., Rollet A. J., Sauvage S., Usseglio-Polatera P., Leblanc B., 2016. *Expertise scientifique collective sur l'impact cumulé des retenues - Rapport complet.* IRSTEA - INRA - ONEMA - Ministère de l'Environnement de l'Énergie et de la Mer, 421 p.

[202] Carluer N., Babut M., Belliard J., Bernez I., Leblanc B., Burger-Leenhardt D., Dorioz J.M., Douez O., Dufour S., Grimaldi S., Habets F., Le Bissonnais Y., Molénat J., Rollet A.J., Rosset V., Sauvage S., Usseglio-Polatera P., 2017. *Impact cumulé des retenues d'eau sur le milieu aquatique. Expertise scientifique collective* (Irstea). Office français de la biodiversité (ex. AFB) – Collection Comprendre pour agir. 200 p.

[203] Douez O., Bichot F., Dupeuty.J-E., 2015. Établissement Public du Marais Poitevin. *Étude d'impact pour l'obtention de l'autorisation unique de prélèvement.* BRGM/RP-64323-FR, 440 p., 5 ann.

[204] Bergkamp G., McCartney M., Dugan P., McNeely J., 2000. Dams, *Ecosystem Functions and Environmental Restoration,* WCD Thematic Review Environmental Issues II. 187 p.

Contributeurs et relecteurs

Arthaud Florent
Université Savoie Mont-Blanc/INRAE - CARRTEL

Anschutz Pierre
Université de Bordeaux/CNRS - EPOC, EPHE

Bartout Pascal
Université d'Orléans - CEDETE

Bertrin Vincent
INRAE – UR EABX, ECOVEA / Pôle R&D Ecosystèmes Lacustres (ECLA)

Bourguetou Guillaume
Agence de l'Eau Adour-Garonne (AEAG)

Cabaret Yohana
AcclimaTerra

Cassou Christophe
Cerfacs

Douez Olivier
BRGM Nouvelle-Aquitaine

Dupuy Alain
Bordeaux INP/Univ. Bordeaux Montaigne - Géoressources & Environnement

Dutartre Alain
ARB NA, Cdr EEE OFB UICN

Fournier Lionel
Département des Landes, Direction de l'Environnement, Syndicat Mixte Géolandes

Gilles-Bon Alix
Association Régionale des Fédérations de Pêche et de Protection du Milieu Aquatique de Nouvelle-Aquitaine

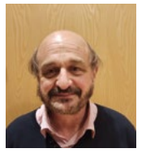
Guibaud Gilles
Université de Limoges - E2lim

Hoffmann Frédéric
Université de Bordeaux/CNRS - EPOC

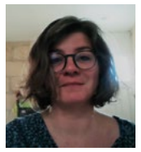
Jamoneau Aurélien
INRAE – UR EABX, ECOVEA / Pôle R&D Ecosystèmes Lacustres (ECLA)

Labat Frédéric
Aquabio ; Université de Rennes - ECOBIO

Laplace-Treyture Christophe
INRAE – UR EABX, ECOVEA / Pôle R&D Ecosystèmes Lacustres (ECLA)



Le Treut Hervé
IPSL, Sorbonne Université



Morin Soizic
INRAE – UR EABX, ECOVEA / Pôle R&D Ecosystèmes Lacustres (ECLA)

Prud'homme François
Conservatoire botanique national des Pyrénées et de Midi-Pyrénées

Pryet Alexandre
Bordeaux INP/Univ. Bordeaux Montaigne - Géoressources & Environnement

Quenault Frank
SIAEBVELG - Lacs Médocains

Ribaudo Cristina
Bordeaux INP/Univ. Bordeaux Montaigne - Géoressources & Environnement

Soubeyroux Jean-Michel
Météo France

Taabni Mohamed
Université de Poitiers - RURALITES

Thiébaut Gabrielle
Université de Rennes - ECOBIO

Tison-Rosebery Juliette
INRAE – UR EABX, ECOVEA / Pôle R&D Ecosystèmes Lacustres (ECLA)

Touchart Laurent
Université d'Orléans - CEDETE

Zuazo Andoni
Département des Landes, Direction de l'Environnement, Syndicat Mixte Géolandes

LES PLANS D'EAU FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Cahier thématique AcclimaTerra n°1

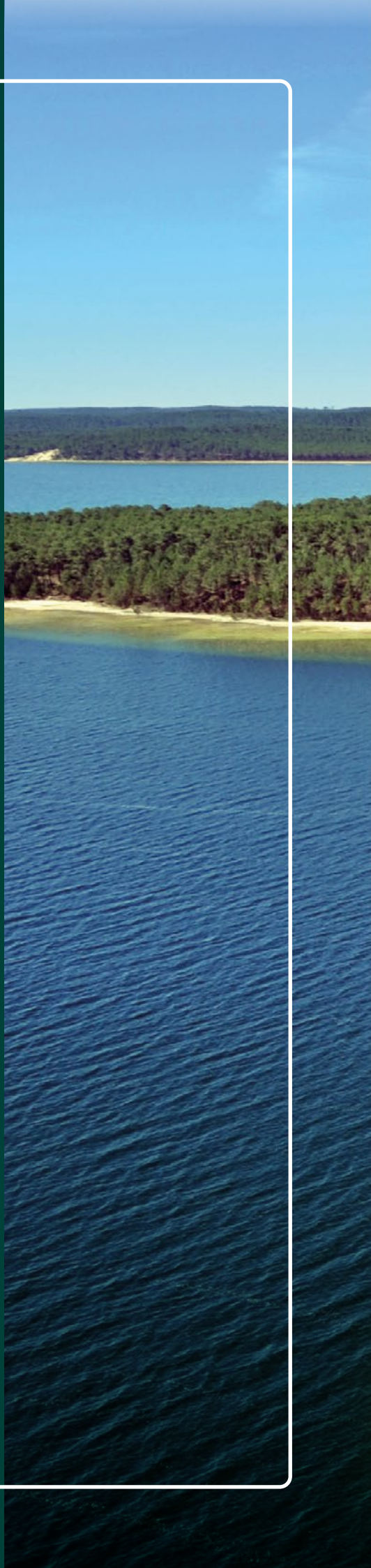
Citation : AcclimaTerra, Ribaudo C. (coord). Les plans d'eau face aux changements climatiques – Cahier N° 1. Éditions AcclimaTerra, 2021, 56 p.

ISBN : 978-2-9574665-1-1
Format : 21 x 29,7 cm

Design et mise en page :
Iti Communication
www.iti-communication.com / 05 55 04 20 19

Impression :
Imprimerie Laplante
www.laplante.fr / 05 56 97 15 05

Imprimé sur du papier recyclé fabriqué en Dordogne



RÉGION
Nouvelle-Aquitaine

***Agissons** aujourd'hui, **réinventons** demain*