

N° 51 - 2026

Sciences Eaux & Territoires



© Thiphaine Peroux

**LES PLANS D'EAU FRANÇAIS FACE AUX CHANGEMENTS
GLOBAUX : SIX ANS DE TRAVAIL POUR AMÉLIORER
LES CONNAISSANCES, LEUR SURVEILLANCE
ET LEUR GESTION**

INRAE

Introduction

- 01 Le Pôle R&D ECLA : la science-action au service des écosystèmes lacustres**
Jean-Marc BAUDOIN, Jean GUILLARD

De la recherche à la production d'outils d'évaluation réglementaires : situation et perspectives

- 13 Les microalgues, sentinelles de l'état écologique des plans d'eau : les étapes clés de l'élaboration et du transfert d'un indicateur biologique**
Soizic MORIN, Albin MEYER, Christophe LAPLACE-TREYTURE, Sébastien BOUTRY, Vincent BERTRIN, Juliette ROSEBERY
- 19 Les indicateurs biologiques de l'ichtyofaune**
Maxime LOGEZ, Christine ARGILLIER
- 25 Un indicateur de l'état physique des lacs**
Nathalie REYNAUD, Héctor RODRIGUEZ-PEREZ, Hadrien FANTON, Christine ARGILLIER
- 31 Utiliser les réseaux trophiques comme indicateur fonctionnel du changement global**
Arnaud SENTIS, Camille LECLERC, Najwa SHARAF, Rosalie BRUEL, Nathalie REYNAUD, Victor FROSSARD

Les innovations du Pôle R&D ECLA pour une surveillance future avancée

- 41 L'ADN environnemental, un outil pour la biosurveillance des lacs : applications pour les populations piscicoles**
Isabelle DOMAIZON, Marine VAUTIER, Maxime LOGEZ, Jonas BYLEMANS, Cécile CHARDON, Alix HERVE, Cyrielle GALLIEGUE, Laury BOUVET, Jean-Marc BAUDOIN
- 55 Analyse du phytoplancton par l'ADN environnemental : nouveaux outils pour évaluer la qualité écologique des plans d'eau**
Clélia DURAN, Benjamin ALRIC, Christophe LAPLACE-TREYTURE, Isabelle DOMAIZON, Laurine VIOLLAZ, Frédéric RIMET
- 65 Les caméras acoustiques, de nouveaux outils non intrusifs pour l'étude de la vie aquatique**
Jean GUILLARD, Quentin GODEAUX, Hervé ROGISSART, Victor FROSSARD, Chloé GOULON, Stéphane JACQUET, François MARTIGNAC, Clément RAUTUREAU
- 71 La plongée scientifique, un outil essentiel pour l'étude des écosystèmes lacustres**
Stéphane JACQUET, Aurélien JAMONEAU, Vincent BERTRIN, Julien DUBLON, Jean-Marc BAUDOIN, Samuel WESTRELIN
- 77 La surveillance des lacs vue de l'espace : une nouvelle source d'information sur le territoire national**
Thierry TORMOS, Emeric LAVERGNE, Santiago PEÑA LUQUE, Nathalie REYNAUD, Nicolas GASNIER, Nicolas PICOT, Anne PUISSANT, Philippe GOUTEYRON, Pascal KOSUTH
- 83 FISHOLA, une application smartphone pour une pêche durable dans les lacs**
Chloé GOULON, Sébastien CACHERA, Thierry TORMOS, Nathalie REYNAUD, Jean GUILLARD

Les écosystèmes lacustres face aux pressions anthropiques locales et globales

- 89 Les évolutions thermiques des lacs français face au changement climatique : surveillance et prédiction**
Rosalie BRUEL, Najwa SHARAF, Olivia DESGUE-ITIER, Jordi PRATS, Nathalie REYNAUD, Tiphaine PEROUX, Thierry TORMOS, Pierre-Alain DANIS, Jean-Philippe JENNY
- 99 Les espèces exotiques dans les lacs français métropolitains**
Victor FROSSARD, Stéphane JACQUET, Cécile CHARDON, Isabelle DOMAIZON, Julien DUBLON, Jean GUILLARD, Alexandre LEVALLOIS, Clément RAUTUREAU, Jean-Claude RAYMOND, Hervé ROGISSART, Chloé VAGNON, Marine VAUTIER, Vincent BERTRIN
- 109 Les Salmonidés dans les lacs de montagne français**
Victor FROSSARD, Arnaud SENTIS, Jean GUILLARD, Jean-Claude RAYMOND, Damien PRONER, Manu VALLAT, Chloé VAGNON
- 117 Énergies renouvelables et écosystèmes lacustres : risques écologiques potentiels liés au développement des centrales photovoltaïques flottantes**
Héctor RODRIGUEZ PEREZ, Jean-Marc BAUDOIN, Fanny COLAS, Julien CUCHEROUSET
- 121 La plus grande retenue hydroélectrique de France (Petit-Saut, Guyane) et les Loutres géantes : situation et perspectives**
Marina CIMINERA, Cécile RICHARD-HANSEN, Jean-Marc BAUDOIN

Restauration et ingénierie écologiques : un enjeu majeur pour la gestion durable de la biodiversité

- 129 Un réseau de sites de démonstration pour évaluer l'efficacité des techniques de restauration des zones littorales des plans d'eau et faire avancer les connaissances en écologie de la restauration**
Marlène ROLAN-MEYNARD, Althaea PANGAUD, Samuel WESTRELIN, Jean-Claude RAYMOND, Julien DUBLON, Christine ARGILLIER
- 133 Enjeux fonctionnels de la restauration des roselières des grands lacs alpins**
Florent ARTHAUD, Baptiste BOGGIO, Jean-Christophe CLÉMENT
- 137 Atténuer l'impact du marnage artificiel sur la biodiversité des retenues : l'exemple du projet UROS et de ses îlots flottants**
Samuel WESTRELIN, Quentin SALMON, Julien DUBLON, Sébastien FONBONNE, Jean-Marc BAUDOIN
- 143 Végétaliser les retenues d'altitude pour atténuer leur impact sur la biodiversité**
Florent ARTHAUD, Benjamin GERFAND, Stéphanie GAUCHERAND, André EVETTE, Léo TIXIER, Pierre BERTELOOT, Samuel WESTRELIN

Accélérer le transfert des connaissances face aux urgences environnementales

- 149 Panorama des réseaux de surveillance des plans d'eau en France**
Thierry TORMOS, Nathalie REYNAUD
- 153 Centralisation et diffusion des données sur les lacs en France (DataECLA)**
Thierry TORMOS, Nathalie REYNAUD
- 157 Un centre d'expertise et de médiation scientifique sur les écosystèmes lacustres : informer, former et soutenir scientifiquement l'ensemble des acteurs**
Anne TESSIER, Florent ARTHAUD, Jean GUILLARD, Jean-Marc BAUDOIN
- 161 Les omics pour la gestion des milieux aquatiques : rencontre entre chercheurs, gestionnaires et analystes**
Frédéric RIMET, Benjamin ALRIC, Valentin VASSELON, Olivier MONNIER, Aurélie LACOEUILHE, Benoit PAIX, Nicolas POULET



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0). La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, le numéro de l'article et le DOI.

Le Pôle R&D ECLA: la science-action au service des écosystèmes lacustres

Jean-Marc BAUDOIN^{1,2,3}, Jean GUILLARD^{2,4}

¹ Service EcoAqua, DRAS, OFB, Aix-en-Provence, France.

² Pôle R&D ECLA, France.

³ Aix Marseille Univ., INRAE, RECOVER, 13182 Aix-en-Provence, France.

⁴ Univ. Savoie Mont Blanc, INRAE, CARTEL, Thonon-les-Bains, France.

Correspondance : Jean-Marc BAUDOIN, jean-marc.baudoin@ofb.gouv.fr

Les écosystèmes lacustres français abritent une biodiversité remarquable et rendent de nombreux services à la société mais ils sont soumis à des pressions croissantes. À l'interface entre science et gestion, le Pôle R&D ECLA¹ mobilise la recherche pour produire des connaissances et des outils opérationnels pour préserver, restaurer et accompagner l'adaptation des lacs face aux défis de l'Anthropocène. Ce numéro met en lumière vingt-trois résultats marquants issus du programme 2019-2024.

Introduction

La planète connaît actuellement une accélération des bouleversements environnementaux. Définie scientifiquement comme « la grande accélération » (Steffen, 2022 ; McNeill, 2023), cette période correspond à l'entrée dans une nouvelle ère, celle de l'Anthropocène. Elle se caractérise notamment par des impacts simultanés et interconnectés des activités humaines sur le climat, l'eau, la biodiversité, l'alimentation et la santé, défini comme le Nexus (IPBES, 2024a)². Dans ce contexte de crises mondiales, les écosystèmes aquatiques apparaissent particulièrement vulnérables et connaissent parmi les plus fortes érosions de biodiversité à l'échelle mondiale (WWF, 2024)³. Face à ce constat, la science ne peut se limiter à décrire et à prédire les évolutions en cours, elle doit également favoriser une appropriation plus rapide de ses résultats par la société et contribuer activement à la formulation de solutions pour atténuer, voire enrayer, les impacts de ces transformations. Ce repositionnement

de la science au cœur de la société, des entreprises et des politiques publiques, fait partie intégrante des stratégies proposées par l'IPBES pour engager des changements transformateurs permettant de lutter efficacement contre les crises du Nexus (IPBES, 2024b).

La création des pôles R&D, bien que plus ancienne, s'inscrit dans une logique similaire : appuyer scientifiquement la mise en œuvre des politiques publiques environnementales françaises en se plaçant à l'interface entre science et gestion. Cette démarche vise à accélérer le transfert des connaissances vers la société, à éclairer les processus de décision et à mettre à disposition des outils performants pour l'action.

Des parallèles peuvent être établis avec le domaine de la santé humaine, où, afin de structurer les démarches « science-action », des centres nationaux de référence ont été mis en place pour la prise en charge des maladies rares⁴. Leur organisation et leurs objectifs résonnent fortement avec ceux des pôles R&D, centrés sur les enjeux

1. Pôle Recherche et Développement Écosystèmes Lacustres : <https://poleecla.fr/>

2. Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (en anglais : *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*).

3. Fonds mondial pour la nature (en anglais : *World Wildlife Fund*).

4. <https://fondation-maladiesrares.org/les-acteurs-nationaux-et-europeens/>

de « santé environnementale », en particulier pour la préservation et la restauration des écosystèmes aquatiques. Créés en 2007, en parallèle de l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema), devenu depuis l'Office français de la biodiversité (OFB), les pôles R&D constituent des équipes scientifiques pluridisciplinaires originales, associant des agents de l'OFB, établissement public dédié à la protection et à la restauration de la biodiversité, et des scientifiques issus d'organismes de recherche. Ensemble, ils forment des équipes nationales de référence sur des thématiques à forts enjeux pour la biodiversité. Leurs principales missions sont les suivantes :

- identifier les besoins prioritaires de R&D pour la mise en œuvre des politiques publiques, en intégrant une approche prospective ;
- réaliser ou coordonner les travaux de recherche jugés prioritaires ;
- développer des méthodes et des outils opérationnels et de référence ;
- accélérer le transfert des connaissances vers l'action, notamment via la formation, l'information (y compris la diffusion des données dans le respect des principes FAIR⁵) et la médiation scientifique ;
- assurer une expertise nationale au service de l'État, de ses services, de ses établissements publics et de l'ensemble des acteurs concernés.

Le pôle Recherche et Développement Écosystèmes lacustres (ECLA) a été mis en place en 2009 pour dynamiser la recherche finalisée sur les écosystèmes lacustres. Les milieux lenticques sont présents en très

grand nombre sur le territoire français, avec plus de huit cent mille plans d'eau (figure ①), qui couvrent à eux seuls plus de 1 % du territoire et stockent environ dix-huit milliards de m³ d'eau (INPE, 2024)⁶. Ils concentrent à la fois une importante biodiversité (près de 6 % de la biodiversité nationale à eux seuls), de nombreux usages (récréatifs, énergétiques, agricoles, etc.), et assurent de multiples services écosystémiques (approvisionnement en eau potable, régulation des flux de carbone, etc.). Ils sont également soumis à de nombreuses pressions anthropiques, notamment les pollutions chimiques et le changement climatique. Cette forte concentration d'enjeux au sein de mêmes espaces naturels rend nécessaire la conciliation des usages et la prise de décision fondée sur des bases scientifiques à la fois robustes et indépendantes.

Historique du Pôle R&D ECLA

C'est en 2009 que le Pôle, initialement dénommé « Pôle d'étude et de recherche Hydroécologie des plans d'eau », est créé entre des équipes spécialisées du Cemagref (devenue Irstea puis INRAE) et de l'Onema (devenu Agence française de la biodiversité puis OFB). À cette époque, la directive européenne cadre sur l'eau (DCE, 2000) doit être déclinée en France et il existe de nombreuses lacunes en termes d'outils de surveillance et d'évaluation de l'état écologique des écosystèmes lacustres. Les scientifiques de l'Onema et du Cemagref sont alors regroupés en une équipe commune et s'emploient à développer les méthodes standardisées qui permettront de surveiller l'hydromorphologie, la physicochimie, et les compartiments biologiques, ainsi que de déterminer l'état écologique des lacs à travers différents outils de bioindication. Les réseaux de surveillance de la DCE étant majoritairement composés de plans d'eau supérieurs à cinquante hectares, ces développements ont prioritairement été pensés pour des masses d'eau de grandes dimensions.

Le Pôle R&D ECLA a progressivement été identifié par les acteurs de l'eau et de l'environnement, comme une structure de référence au niveau national et a ainsi été sollicité pour répondre à d'autres enjeux que ceux de la mise en œuvre de la DCE : effets du changement climatique, préservation d'espèces patrimoniales, lutte contre les espèces invasives, atténuation des effets délétères de certains usages et restauration écologique. Face à ces nombreuses sollicitations, des collaborations avec d'autres équipes de recherche se sont développées. C'est ainsi que dix ans après sa création, le Pôle a choisi d'embrasser une plus large gamme de thématiques scientifiques et d'augmenter ses compétences en s'associant à l'unité mixte de recherche CARTEL (INRA – USMB)⁷, à l'unité EABX⁸ du centre Irstea de Bordeaux, et au Pôle « étangs continentaux » de l'ONCFS⁹. Il devient ainsi le 1^{er} janvier 2019 le Pôle R&D Écosystèmes Lacustres (ECLA) (photo ①). Anticipant d'un an la fusion de l'INRA et d'Irstea d'une part, et de l'AFB et de l'ONCFS d'autre part, le Pôle est devenu en 2020 une structure rassemblant trois organismes : l'OFB, INRAE et l'USMB. Ce partenariat scientifique a été prolongé en 2025 pour six années supplémentaires avec un nouveau programme scientifique tourné vers l'innovation, l'action et la médiation scientifique.

Photo ① – Séminaire de fondation du Pôle R&D Écosystèmes Lacustres à Evian-les-Bains, au bord du Léman, 28 mars 2019.



5. Ensemble de principes directeurs pour gérer les données de la recherche visant à les rendre faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables par l'homme et la machine (en anglais, FAIR : Findable, Accessible, Interoperable, Reusable).

6. INPE : Inventaire national des plans d'eau.

7. CARTEL : Centre alpin de recherche sur les réseaux trophiques et les écosystèmes limniques, alors unité mixte de recherche de l'Institut national de recherche en agriculture (INRAE) et de l'Université de Savoie Mont Blanc (USMB).

8. EABX : Écosystèmes aquatiques et changements globaux », alors unité de recherche de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea).

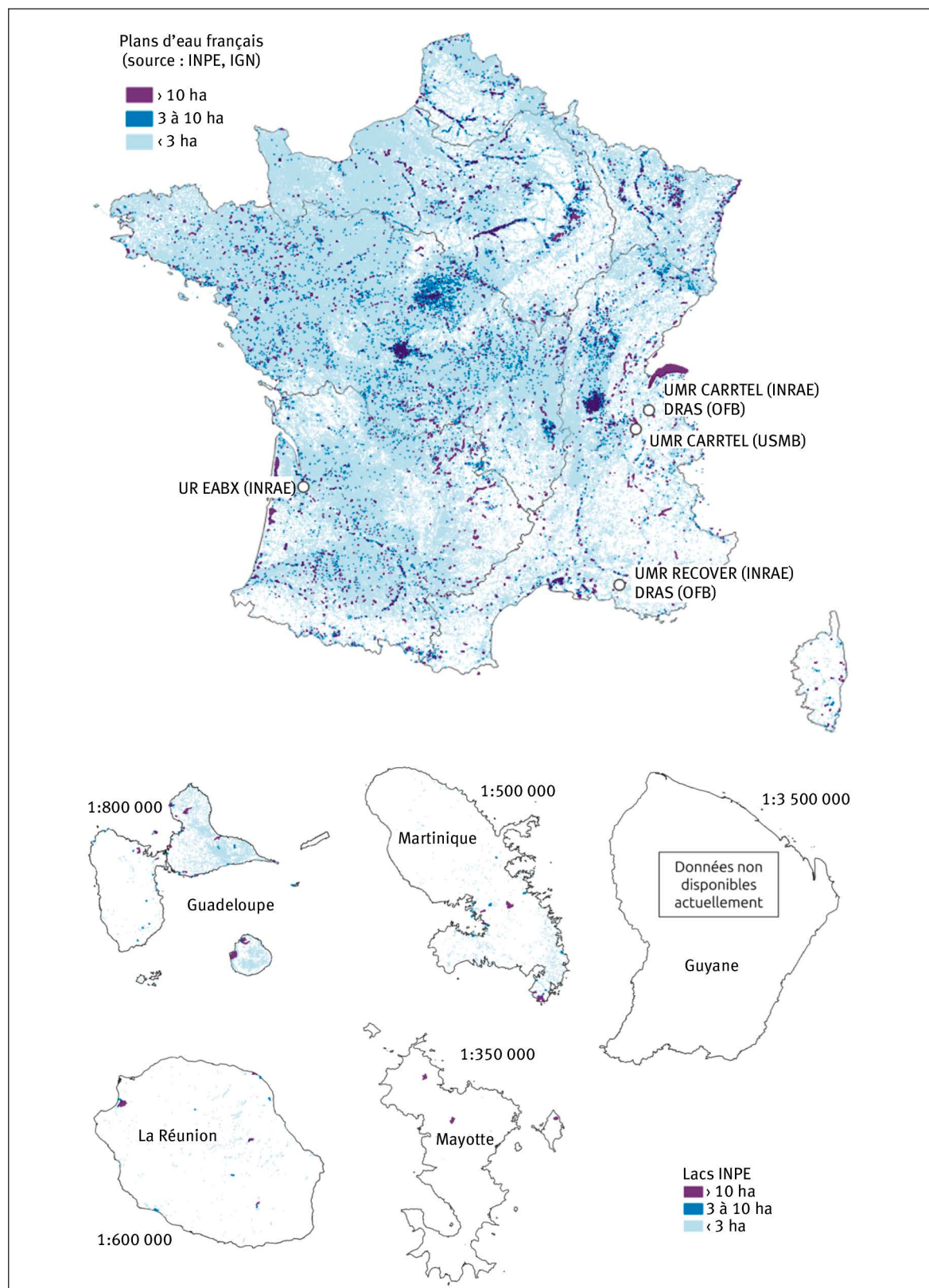
9. Office national de la chasse et de la faune sauvage.

Organisation et fonctionnement

Le collectif du Pôle est majoritairement (64 %) composé de chercheurs, dont un tiers sont en contrat à durée déterminée, qui pilotent, réalisent et valorisent les projets (une collection dédiée dans la base de données HAL

a été créée : https://hal.science/POLE_RD_ECLA). Les travaux sont conduits avec l'appui de personnels techniques spécialisés (techniciens, assistants ingénieurs et ingénieurs d'étude) impliqués à la fois dans des tâches scientifiques et techniques et dans l'animation et la coor-

Figure 1 – Cartographie des plans d'eau de France (INPE, 2024) et des implantations du Pôle R&D ECLA.



10. Un mésocosme est un système expérimental contrôlé qui reproduit, à une échelle intermédiaire, certaines caractéristiques d'un écosystème naturel. Il s'agit d'un compromis entre les expériences en laboratoire et les études sur le terrain.

dination des travaux avec des partenaires gestionnaires et les services territoriaux de l'OFB. Une des forces du Pôle R&D ECLA est de pouvoir s'appuyer sur des collaborations étroites avec les services territoriaux de l'OFB (services connaissances, laboratoires d'hydrobiologies) et les Agences de l'eau. Avec l'appui de ce maillage national d'experts, le Pôle peut rapidement acquérir un grand nombre de données sur l'ensemble du territoire, mais aussi déployer, tester, améliorer et valider à grande échelle les méthodes et outils qu'il développe.

Pour coordonner et animer ce collectif, le Pôle s'est doté de quatre niveaux d'organisation. Le premier se matérialise par quatre axes thématiques, qui structurent le programme scientifique, chaque axe étant animé par deux scientifiques (en général un OFB et un académique). L'objectif principal est de dynamiser l'animation scientifique des agents du Pôle autour des sujets portés dans l'axe thématique et de coordonner et prioriser la programmation des projets de recherche. Le second niveau d'organisation est la direction du Pôle, composée d'un directeur représentant l'OFB et un directeur adjoint représentant les organismes de recherche. La direction fait le lien avec les tutelles, les ministères en charge de l'environnement et de la recherche, les instances nationales et internationales, les acteurs scientifiques et de la gestion des plans d'eau. Elle est en charge de l'élaboration des orientations stratégiques du Pôle, de la programmation annuelle priorisée sur les plans scientifiques, techniques et budgétaires, et de l'organisation, la coordination et l'animation avec les responsables des axes thématiques. Le troisième niveau d'organisation est le comité de direction (CODIR) composé de la direction du Pôle et d'un représentant de chacune des unités de recherche constitutives afin d'assurer la pleine convergence des orientations du Pôle et des unités de recherche, de prioriser la programmation annuelle, et

de construire une vision prospective partagée des orientations scientifiques et des moyens humains. Enfin, le quatrième et dernier niveau d'organisation est celui du comité de pilotage (COPIL), composé des membres du CODIR et de représentants des directions des établissements partenaires du Pôle. Les principales missions de ce COPIL sont de vérifier que les objectifs du Pôle soient en adéquation avec la politique scientifique et les missions des établissements partenaires et de valider la programmation des projets de recherche.

Outre la mutualisation des moyens humains à travers cette organisation, l'une des grandes forces du Pôle R&D ECLA est aussi de partager les infrastructures scientifiques souvent très coûteuses et l'ensemble des moyens techniques des différentes équipes qui le composent. Les agents du Pôle ont ainsi accès à d'importants moyens, notamment des laboratoires et des plateformes d'analyse de haut niveau, des mésocosmes¹⁰, des chambres climatiques, des serveurs informatiques (dont des serveurs de calcul puissants), ou bien encore à d'importants moyens navigants (photo 2).

Programmation scientifique : bilan et perspectives

Le programme scientifique (2025-2030), fruit de réflexions collectives au sein du Pôle, a été construit à partir de l'analyse critique du précédent programme (2019-2024) et de la remontée des besoins de connaissances identifiés par les décideurs et les acteurs publics : ministère en charge de l'environnement, services territoriaux et centraux de l'OFB, Agences de l'eau, Offices de l'eau, directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement, parcs nationaux. Face à l'accélération des bouleversements environnementaux, le Pôle doit à son échelle, tenter de limiter l'érosion de la biodiversité et la dégradation du fonctionnement des écosystèmes lacustres en s'inscrivant pleinement dans une démarche « science-action ». Outre les objectifs de développement des connaissances scientifiques, une attention particulière a donc également été portée aux missions de valorisation, de transfert opérationnel et plus globalement de médiation scientifique du Pôle.

Les principales inflexions de ce nouveau programme ont été :

- d'intégrer un objectif d'action dans chacun de ses axes thématiques, pour passer du seul diagnostic des problèmes à la proposition de solutions. À la différence du programme précédent, la nature des axes n'est pas guidée par le triptyque « caractériser, évaluer, agir », mais par des thèmes scientifiques prioritaires dans lesquels le triptyque « caractériser, évaluer, agir » est décliné ;
- d'intégrer les questions relatives à l'Outre-Mer dans chacun des axes thématiques ;
- de dédier un axe thématique entier à la biodiversité lacustre pour répondre au besoin de connaissances au niveau national sur son état, ses trajectoires et sa gestion ;
- de repositionner la problématique des pollutions chimiques comme un enjeu majeur, en plus de celui des effets du changement climatique ;
- de s'emparer des problématiques émergentes de surfréquentation des espaces naturels et de développement des énergies renouvelables.

Encadré 1 – Composition en personnel du Pôle R&D ECLA.

Le Pôle rassemble près de quatre-vingts agents, soixante et un permanents auxquels s'ajoutent chaque année en moyenne près de vingt personnels contractuels. Le consortium est majoritairement représenté par des agents issus des établissements de recherche (86 %) et en particulier d'INRAE (73 %), les agents de l'OFB représentant quant à eux près de 14 % du personnel. Les effectifs sont répartis géographiquement sur les quatre sites des unités de recherche qui composent le Pôle (figure 1) :

- neuf agents de l'OFB, dont sept issus du service « Fonctionnement, préservation et restauration des écosystèmes aquatiques continentaux et marins » (EcoAqua) de la Direction de la Recherche et de l'Appui scientifique (DRAS), un issu du service Service Eau et Milieux Aquatiques (SEMA) de la Direction Surveillance, Évaluation, Données (DSUED) et un issu de l'Unité spécialisée Milieux lacustres (USML) de la Direction Régionale Auvergne-Rhône-Alpes ;
- neuf agents de l'équipe « Fonctionnement et restauration des hydrosystèmes continentaux » (FRESHCO) de l'UMR « Risques, écosystèmes, vulnérabilité, environnement, résilience » (RECOVER) d'INRAE et de l'AMU ;
- onze agents de l'équipe « Écologie des Communautés Végétales Aquatiques et impact des pressions multiples » (ECOVEA) de l'UR « Écosystèmes aquatiques et changements globaux » (EABX) d'INRAE ;
- trente-deux agents de l'UMR « Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et les Ecosystèmes Limniques » (CARTEL), dont vingt-six INRAE et six USMB.

C'est au sein des deux centres névralgiques du Pôle, sur les sites INRAE d'Aix-en-Provence et de Thonon-les-bains, que les neuf agents OFB sont accueillis pour former de véritables équipes mixtes qui travaillent ensemble au quotidien.

Photo ② – À gauche, plateforme expérimentale de l'unité RECOVER ; à droite, bateau de recherche La Mirandelle de Haute-Savoie de l'unité mixte de recherche CARTTEL.



Subdivisé en quatre axes thématiques qui se déclinent en grands objectifs et en actions prioritaires de recherche, le programme détaillé (2025-2030) est accessible ici : <https://poleecla.fr/recherche>

Afin d'illustrer ce programme scientifique dans ce numéro spécial de SET, nous proposons une série de vingt-trois articles basés sur les travaux du Pôle réalisés entre 2019 et 2024, en les déclinant dans cinq sections :

- section A : De la recherche à la production d'outils d'évaluation réglementaires : situation et perspectives (Axe 1) ;
- section B : Les innovations du Pôle R&D ECLA pour une surveillance future avancée (Axe 1) ;
- section C : Les écosystèmes lacustres face aux pressions anthropiques locales et globales (Axe 2 et Axe 3) ;
- section D : Restauration et ingénierie écologiques : un enjeu majeur pour la gestion durable de la biodiversité (Axe 3) ;
- section E : Accélérer le transfert des connaissances face aux urgences environnementales (Axe 4).

Axe 1 – État et gestion de la biodiversité lacustre

Les écosystèmes lacustres abritent une très grande diversité d'espèces, dont la gestion est un enjeu majeur des stratégies nationales et internationales pour la biodiversité. La mise en œuvre pratique des politiques environnementales se heurte encore à d'importantes lacunes de connaissances dues notamment à la difficulté de la mise en œuvre des observations, incompatibles avec une surveillance à large échelle et à haute fréquence. De plus, les méthodes classiquement utilisées sont souvent très impactantes pour les individus prélevés (mortalité, blessures, stress) et sélectives (difficulté à échantillonner certaines espèces). Il apparaît donc particulièrement difficile de fournir une évaluation robuste de l'état de la biodiversité lacustre au niveau national, de hiérarchiser les principales menaces qui pèsent sur elle et les tendances à venir. Outre ce manque de connaissances qui complique la prise de conscience des enjeux écologiques et le développement de mesures de gestion efficaces, la restauration de la biodiversité lacustre souffre, comme c'est le cas pour beaucoup d'autres milieux, du manque de retours d'expérience scientifiquement documentés. Le premier axe du projet scientifique 2025-2030 du Pôle R&D ECLA propose de lever ces verrous en se fixant trois objectifs, dans la continuité du précédent programme.

Objectif 1 – Améliorer la surveillance de la biodiversité lacustre, en développant et standardisant des méthodes innovantes et non invasives de suivi, en particulier avec l'ADN Environnementale (ADNe) mais aussi les méthodes hydroacoustiques et la télédétection spatiale.

- L'ADN environnemental, un outil pour la biosurveillance des lacs : applications pour les populations piscicoles – Coordinatrice de la rédaction de l'article : Isabelle Domaizon (section B).

<https://revue-set.fr/article/view/10060>

- Analyse du phytoplancton par l'ADN environnemental : nouveaux outils pour évaluer la qualité écologique des plans d'eau – Coordinateur de la rédaction de l'article : Frédéric Rimet (section B).

<https://revue-set.fr/article/view/9926>

- Les caméras acoustiques, de nouveaux outils non intrusifs pour l'étude de la vie aquatique – Coordinateur de la rédaction de l'article : Jean Guillard (section B) -

<https://revue-set.fr/article/view/10059>

- La plongée scientifique, un outil essentiel pour l'étude des écosystèmes lacustres – Coordinateur de la rédaction de l'article : Stéphan Jacquet (section B).

<https://revue-set.fr/article/view/9925>

- La surveillance des lacs vus de l'espace : une nouvelle source d'information sur le territoire national – Coordinateur de la rédaction de l'article : Thierry Tormos (section B).

<https://revue-set.fr/article/view/9928>

Objectif 2 – Évaluer l'état de la biodiversité lacustre en améliorant les connaissances sur l'état et la dynamique des populations d'espèces à enjeux et sur les communautés des milieux peu documentés (ex. : écosystèmes d'Outre-Mer), développer des indicateurs synthétiques d'état de la biodiversité lacustre afin d'alimenter l'Observatoire national de la biodiversité et les travaux de l'Union internationale pour la conservation de la nature, dresser un état de la biodiversité lacustre française et évaluer les tendances à moyen/long terme, en hiérarchisant les principales pressions anthropiques qui pèsent sur elle.

- Les microalgues, sentinelles de l'état écologique des plans d'eau : les étapes clés de l'élaboration et du transfert d'un indicateur biologique – Coordinatrice de la rédaction de l'article : Juliette Roseberry (section A).

<https://revue-set.fr/article/view/9565>

- Les indicateurs biologiques de l'ichtyofaune – Coordinatrice de la rédaction de l'article: Christine Argillier (section A). <https://revue-set.fr/article/view/9923>
- Un indicateur de l'état physique des lacs – Coordinatrice de la rédaction de l'article: Nathalie Reynaud (section A). <https://revue-set.fr/article/view/9927>
- Utiliser les réseaux trophiques comme indicateur fonctionnel du changement global – Coordinateur de la rédaction de l'article: Arnaud Sentis (section A). <https://revue-set.fr/article/view/10055>

Objectif 3 – Gérer la biodiversité lacustre, en développant des méthodes de préservation ou de restauration d'espèces menacées ; et analyser l'efficacité des méthodes de gestion concernant les espèces qui peuvent altérer la biodiversité originelle des lacs, leur fonctionnement, les services écosystémiques rendus, ou la santé humaine, en particulier les espèces invasives et les cyanobactéries.

- La plus grande retenue hydroélectrique de France (Petit-Saut, Guyane) et les loutres géantes: situation et perspectives – Coordinatrice de la rédaction de l'article: Marina Ciminera (section C). <https://revue-set.fr/article/view/9931>

- Les espèces exotiques dans les lacs français métropolitains – Coordinateur de la rédaction de l'article: Victor Frossard (section C). <https://revue-set.fr/article/view/9929>

AXE 2 – Trajectoire des écosystèmes lacustres et mesures d'atténuation face au changement climatique

Cet axe traite des effets du changement climatique sur les écosystèmes lacustres, l'une des principales causes d'érosion de la biodiversité. Ces systèmes sont particulièrement sensibles aux élévations de température car leur fonctionnement écologique est fortement dépendant de mouvements thermodynamiques au sein de la colonne d'eau. Outre les effets directs des conditions thermiques sur les biocénoses, le changement climatique pourrait donc profondément modifier le fonctionnement de ces écosystèmes et entraîner la disparition de nombreuses espèces. Il pourrait également interagir avec d'autres pressions anthropiques, comme l'eutrophisation, et contrecarrer les efforts de restauration écologique. Cet axe intègre une large gamme de thématiques allant des trajectoires thermiques des lacs à la restauration écologique. Il combine des approches interdisciplinaires et des méthodes innovantes pour mieux comprendre et atténuer les impacts du changement climatique sur les écosystèmes lacustres. Il s'organise autour de trois grands objectifs.

Objectif 1 – Surveiller les évolutions thermiques des lacs français, en appuyant le déploiement et le maintien du réseau national de suivi thermique des lacs français (RNT) ; et en développant des outils de prédiction des évolutions thermodynamiques des lacs en fonction des différents scénarios du GIEC¹¹

- Les évolutions thermiques des lacs français face au changement climatique: surveillance et prédiction – Coordinatrice de la rédaction de l'article: Rosalie Bruel (section C) – <https://revue-set.fr/article/view/10051>

Objectif 2 – Évaluer les effets du changement climatique sur les populations aquatiques les plus sensibles/ vulnérables, sur les communautés biologiques à l'échelle nationale et sur le fonctionnement des lacs (en particulier sur le cycle du carbone), et déterminer les évolutions probables en fonction des différents scénarios du GIEC ; développer des indicateurs synthétiques de vulnérabilité des lacs face au changement climatique et évaluer les écosystèmes français les plus menacés.

- Les Salmonidés dans les lacs de montagne français – Coordinateur de la rédaction de l'article: Victor Frossard (section C). <https://revue-set.fr/article/view/9930>

Objectif 3 – Développer et/ou évaluer l'efficacité de mesures de restauration ou de gestion visant à atténuer les effets du changement climatique.

AXE 3 – Usages et anthropisation des milieux lacustres

Outre les effets globaux du changement climatique, les écosystèmes lacustres sont également soumis à de nombreuses pressions locales, résultant des activités humaines. Les nombreux services écosystémiques qu'ils soutiennent ont été à l'origine du développement historique de l'urbanisation et des activités industrielles et agricoles autour des rives des lacs naturels et, parallèlement de nombreux écosystèmes artificiels ont été créés pour satisfaire différents usages (hydroélectricité, irrigation, eau potable, granulats, aquaculture...), leur fonctionnement et leur biodiversité pouvant alors s'éloigner fortement de ceux d'un écosystème naturel. Enfin, les écosystèmes lacustres sont des milieux emblématiques qui concentrent de nombreuses activités récréatives et culturelles.

Cet axe propose de réexaminer les pollutions historiques sous l'angle de l'effet synergique potentiel du changement climatique, de s'emparer de la question des effets des polluants émergents et des nouvelles problématiques de surfréquentation des espaces naturels et de développement des énergies renouvelables, notamment l'émergence du photovoltaïque flottant, tout en investiguant la recherche de solutions pour restaurer, renaturer les écosystèmes dégradés ou rechercher des mesures d'atténuation efficaces des principales pressions. Il se décompose en trois objectifs.

Objectif 1 – Évaluer les effets des pollutions chimiques, en particulier émergentes sur les différents niveaux d'intégration biologique ; développer des indicateurs de vulnérabilité des écosystèmes lacustres aux pressions chimiques, pour anticiper et prioriser la mise en place de mesures de gestion ; finaliser les derniers indicateurs DCE manquants pour les éléments de qualité physico-chimiques (oxygène, acidification, salinité).

Objectif 2 : Évaluer les effets de l'intensification de certains usages anthropiques des lacs sur la biodiversité et le fonctionnement des lacs, en particulier le développement du photovoltaïque flottant et l'augmentation des activités récréatives, en particulier dans les aires protégées.

11. Groupe d'expert intergouvernemental sur le climat

– Énergies renouvelables et écosystèmes lacustres : risques écologiques potentiels liés au développement des centrales photovoltaïques flottantes – Coordinateur de la rédaction de l'article : Hector Rodriguez-Perez (section C). <https://revue-set.fr/article/view/10056>

Objectif 3 – Proposer des mesures efficaces de restauration écologique et de mitigation des pressions.

– Un réseau de sites de démonstration pour évaluer l'efficacité des techniques de restauration des zones littorales des plans d'eau et faire avancer les connaissances en écologie de la restauration – Coordinatrice de la rédaction de l'article : Marlène Rolan-Meynard (section D). <https://revue-set.fr/article/view/10057>

– Enjeux fonctionnels de la restauration des roselières des grands lacs alpins – Coordinateur de la rédaction de l'article : Florent Arthaud (section D). <https://revue-set.fr/article/view/9932>

– Atténuer l'impact du marnage artificiel sur la biodiversité des retenues : l'exemple du projet UROS et de ses îlots flottants – Coordinateur de la rédaction de l'article : Samuel Westrelin (section D). <https://revue-set.fr/article/view/9933>

– Végétaliser les retenues d'altitudes pour atténuer leur impact sur la biodiversité – Coordinateur de la rédaction de l'article : Florent Arthaud (section D). <https://revue-set.fr/article/view/9934>

AXE 4 – Valorisation et transfert des connaissances

L'axe 4, centré sur les actions de valorisation et de transfert, est un axe transversal indissociable des activités de recherche du Pôle R&D ECLA. Les actions dans cet axe visent notamment à garantir la mise en visibilité et le rayonnement des travaux, le partage de l'expertise et des connaissances auprès de différents publics, ainsi que le transfert des résultats issus de la recherche vers la sphère opérationnelle. Ces actions recoupent en grande partie les missions d'un futur Centre d'expertise et de médiation scientifique, au sein duquel elles auront vocation à s'intégrer.

Cet axe est découpé en quatre objectifs principaux.

Objectif 1 : Gérer des données et diffuser l'information, organiser et mettre à disposition des produits et informations numériques au travers d'outils et de plates-formes ; alimenter et valoriser les projets de recherche des différents partenaires scientifiques, ainsi qu'appuyer la mise en œuvre des politiques publiques (notamment la directive cadre européenne sur l'eau).

– Centralisation et diffusion des données sur les lacs en France (DataECLA) – Coordinatrice de la rédaction de l'article : Nathalie Reynaud (section E). <https://revue-set.fr/article/view/9936>

– FISHOLA, une application smartphone pour une pêche durable dans les lacs – Coordinatrice de la rédaction de l'article : Chloé Goulon (section E). <https://revue-set.fr/article/view/10053>

– Panorama des réseaux de surveillance des plans d'eau en France – Coordinateur de la rédaction de l'article : Thierry Tormos (section E). <https://revue-set.fr/article/view/9935>

Objectif 2 – Fournir une expertise de haut niveau sur les milieux lacustres au niveau national. Fort de plus de dix années d'existence et d'un large consortium d'experts dans diverses thématiques en lien avec la limnologie, le Pôle R&D ECLA est particulièrement compétent pour aider à répondre aux nombreuses questions actuelles de société concernant l'usage et la préservation des milieux lacustres.

– Les omics pour la gestion des milieux aquatiques : rencontre entre chercheurs, gestionnaires et analystes – Coordinateur de la rédaction de l'article : Frédéric Rimet (section B) – <https://revue-set.fr/article/view/9937>

Objectif 3 – Œuvrer à la diffusion des connaissances issues du monde académique relatives aux écosystèmes lacustres constituée depuis sa création, l'une des principales missions du Pôle R&D ECLA.

L'objectif est spécifiquement dédié à l'organisation ou la participation à des actions de formation auprès de publics aussi bien professionnels qu'étudiants, sur des sujets ciblés tels que le fonctionnement, la surveillance, la restauration ou les enjeux sur les écosystèmes lacustres.

Objectif 4 : L'amélioration de la communication vers le grand public est l'une des missions qui incomberont au futur Centre d'expertise et de médiation scientifique. Dans un contexte de développement du Pôle R&D ECLA, les actions visent à coordonner et améliorer la communication sur les activités du Pôle et, de manière plus générale, sur les écosystèmes lacustres pour contribuer à mieux faire connaître ces milieux et leurs communautés, et sensibiliser un large public aux problématiques associées.

– Un centre d'expertise et de médiation scientifique sur les écosystèmes lacustres : informer, former et soutenir scientifiquement l'ensemble des acteurs – Coordinatrice de la rédaction de l'article : Anne Tessier (section E). <https://revue-set.fr/article/view/10058>

Conclusion

Dans le contexte d'un Anthropocène marqué par l'intensification des pressions environnementales, les écosystèmes lacustres apparaissent comme des sentinelles particulièrement sensibles des changements globaux. La structuration du Pôle R&D ECLA (OFB – INRAE – USMB), est un dispositif original et intégré qui permet de renforcer l'articulation entre production de connaissances scientifiques et action publique. Les travaux menés au cours des dernières années, ainsi que les perspectives pour la période 2025-2030, témoignent de la capacité du Pôle à mobiliser des approches variées et des outils innovants pour mieux comprendre, surveiller et gérer ces milieux complexes. Qu'il s'agisse de l'évaluation de la biodiversité, de l'analyse des impacts du changement climatique, de la prise en compte des pressions anthropiques ou du développement de solutions de restauration, les résultats produits contribuent à éclairer les décisions publiques et à améliorer les pratiques de gestion. Au-delà de la production scientifique, la force d'ECLA réside également dans sa capacité à structurer le transfert des connaissances vers les gestionnaires, les décideurs et plus largement la société.

Cette interface science-gestion constitue un levier essentiel pour répondre aux défis actuels, dans un contexte où les enjeux liés à l'eau, à la biodiversité et au climat sont étroitement imbriqués. En consolidant ses actions de recherche, d'expertise et de valorisation, le Pôle R&D ECLA, soutenu par ses trois tutelles (OFB – INRAE – USMB), s'inscrit pleinement dans une dynamique de transformation des politiques environnementales, en apportant des solutions pour assurer la préservation des écosystèmes lacustres. ■

REMERCIEMENTS

Merci à Patrick Lavarde, premier directeur général de l'Onema, qui a eu cette vision « avanguardiste » de l'intérêt de la création de Pôles R&D. Merci à Christine Argillier qui a été à l'initiative de la création du Pôle R&D « Hydroécologie des plans d'eau » et qui en a été la première directrice de 2009 à 2012. Merci à Martin Daufresne, directeur adjoint du Pôle R&D « Hydroécologie des plans d'eau » de 2013 à 2018. Merci à Anne Tessier pour son aide indispensable à la bonne réalisation de ce numéro spécial ainsi qu'aux coordinateurs des articles qui ont permis la finalisation des papiers. Merci à l'ensemble du personnel permanent et en CDD qui a oeuvré pour le Pôle depuis le début, sous ses différentes appellations. C'est votre travail qui a permis son existence, son renforcement et ce numéro spécial.

RÉFÉRENCES

- DCE. (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.*
- INPE. (2024). *Inventaire national des plans d'eau, août 2024.* Inspection générale de l'environnement et du développement durable.
- IPBES. (2024a). *Rapport «Nexus» : Affronter ensemble cinq crises mondiales interconnectées en matière de biodiversité, d'eau, d'alimentation, de santé et de changement climatique, décembre 2024.* <https://www.ipbes.net/nexus/media-release>
- IPBES. (2024b). *Rapport «Évaluation du changement transformateur» : Les causes sous-jacentes de la perte de biodiversité, les facteurs déterminants du changement transformateur et les options pour réaliser la Vision 2050 pour la biodiversité, décembre 2024.* <https://www.ipbes.net/transformation-change/media-release>
- McNeill, J. R. (2023). Great Acceleration. In: Wallenhorst, N., Wulf, C. (eds), *Handbook of the Anthropocene*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25910-4_134
- Steffen, W. (2022). The Earth System, the Great Acceleration and the Anthropocene. In: Williams, S.J., Taylor, R. (eds), *Sustainability and the New Economics*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78795-0_2
- WWF. (2024). *Rapport Planète Vivante 2024 - Un système en péril.* World Wildlife Fund, Gland, Suisse.

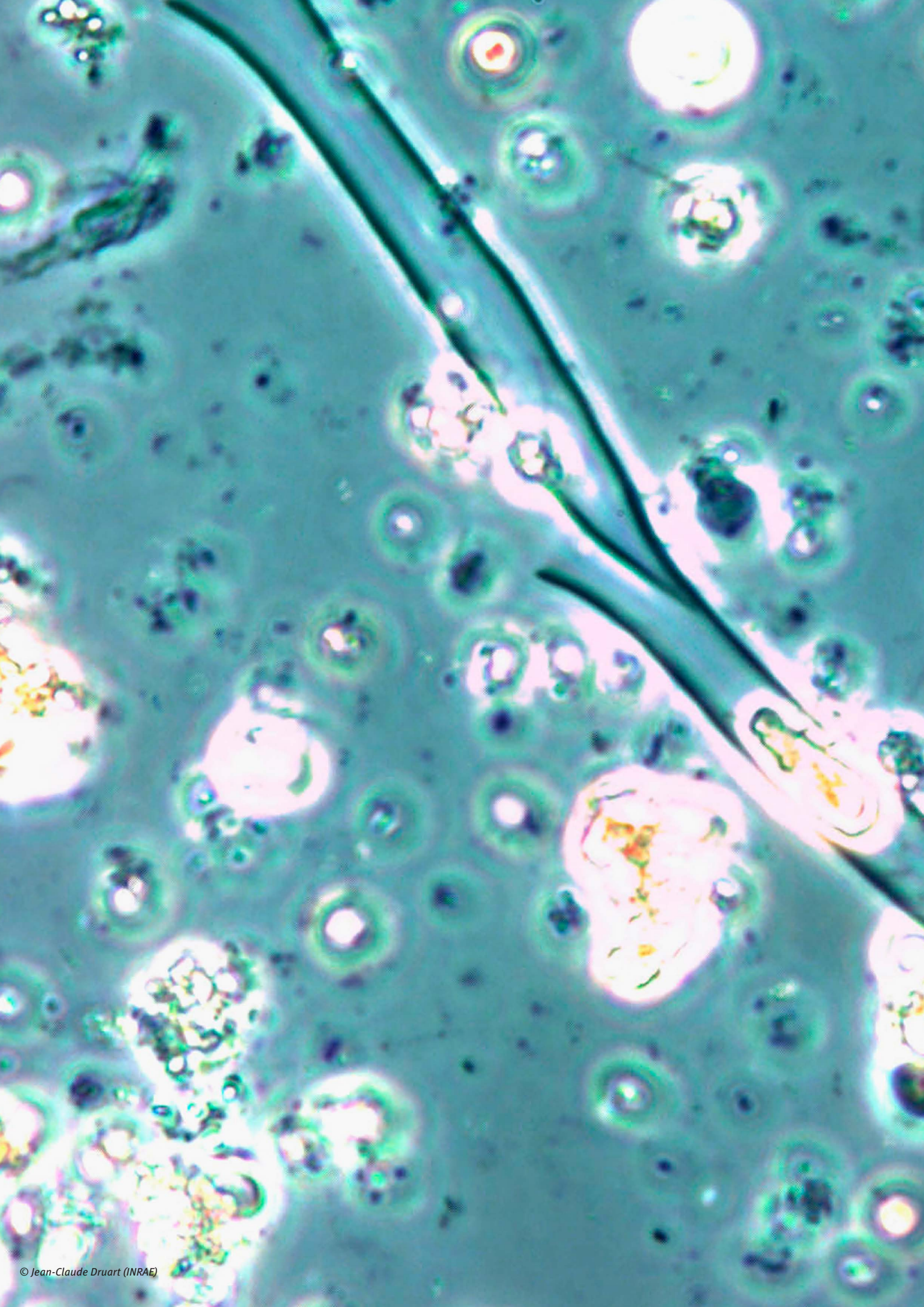




DE LA RECHERCHE À LA PRODUCTION D'OUTILS D'ÉVALUATION RÉGLEMENTAIRES : SITUATION ET PERSPECTIVES

Cette partie présente les nouveaux indices, indicateurs élaborés et standardisés ou les indices, indicateurs réactualisés servant à évaluer au niveau d'un compartiment, biotique et abiotique, la qualité écologique des lacs, comme requis dans le cadre de la directive cadre sur l'eau, mais aussi à évaluer les effets du changement climatique. Chaque article présente la mobilisation des connaissances, les concepts utilisés, les limites/difficultés et les perspectives.

- 13 Les microalgues, sentinelles de l'état écologique des plans d'eau : les étapes clés de l'élaboration et du transfert d'un indicateur biologique**
Soizic MORIN, Albin MEYER, Christophe LAPLACE-TREYTURE, Sébastien BOUTRY, Vincent BERTRIN, Juliette ROSEBERY
- 19 Les indicateurs biologiques de l'ichtyofaune**
Maxime LOGEZ, Christine ARGILLIER
- 25 Un indicateur de l'état physique des lacs**
Nathalie REYNAUD, Héctor RODRIGUEZ-PEREZ, Hadrien FANTON, Christine ARGILLIER
- 31 Utiliser les réseaux trophiques comme indicateur fonctionnel du changement global**
Arnaud SENTIS, Camille LECLERC, Najwa SHARAF, Rosalie BRUEL, Nathalie REYNAUD, Victor FROSSARD





Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0). La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, le numéro de l'article et le DOI.

Les microalgues, sentinelles de l'état écologique des plans d'eau : les étapes clés de l'élaboration et du transfert d'un indicateur biologique

Soizic MORIN^{1,2}, Albin MEYER^{1,2}, Christophe LAPLACE-TREYTURE^{1,2}, Sébastien BOUTRY^{1,2}, Vincent BERTRIN^{1,2}, Juliette ROSEBERY^{1,2}

¹ INRAE, EABX, 50 avenue de Verdun, 33612 Cestas-Gazinet, France.

² Pôle R&D ECLA, France.

Correspondance : Soizic MORIN, soizic.morin@inrae.fr

Les microalgues — organismes unicellulaires vivant en suspension ou fixés sur des substrats — jouent un rôle clé dans l'évaluation de l'état écologique des plans d'eau. Ces organismes, sensibles aux perturbations environnementales, constituent des bioindicateurs privilégiés. Pour répondre aux exigences de la directive cadre européenne sur l'eau (DCE), la France a développé deux indicateurs complémentaires basés sur ces organismes : l'indice phytoplancton lacustre (IPLAC) et l'indice biologique diatomées en plans d'eau (IBDL). Cet article retrace les principales étapes de leur conception et de leur mise en œuvre, mettant en lumière l'apport essentiel de la recherche pour éclairer les politiques de gestion des milieux aquatiques.

Introduction

Les microalgues comptent parmi les principaux producteurs primaires des plans d'eau, avec les macrophytes. Ces microalgues unicellulaires vivent sous forme fixée (phytobenthos), principalement dans les zones peu profondes des plans d'eau, ou en suspension dans la colonne d'eau (phytoplancton). Elles assurent un large éventail de fonctions écologiques (émission d'oxygène et piégeage du carbone, production de matière organique, cycle des nutriments, épuration des eaux, ressource trophique contribuant au transfert d'éléments vers les consommateurs primaires...). Ces organismes cosmopolites sont extrêmement diversifiés (Guiry et Guiry, 2023) et montrent face à la pollution des degrés de résistance très différents en fonction des espèces. Leur taux de multiplication élevé, leur interaction constante avec leur environnement chimique (substances dissoutes environnantes), en font ainsi d'excellents indicateurs d'eutrophication et de qualité générale des eaux (Wu *et al.*, 2017).

Le phytoplancton et le phytobenthos (ici vu sous la seule fraction des diatomées benthiques) sont ainsi des éléments biologiques identifiés par la directive cadre sur l'eau (DCE) pour participer à la définition et à l'évaluation de l'état écologique des plans d'eau. Chaque pays membre est tenu de disposer d'indicateurs basés sur ces maillons biologiques, et de les mettre en œuvre selon un programme de surveillance précis.

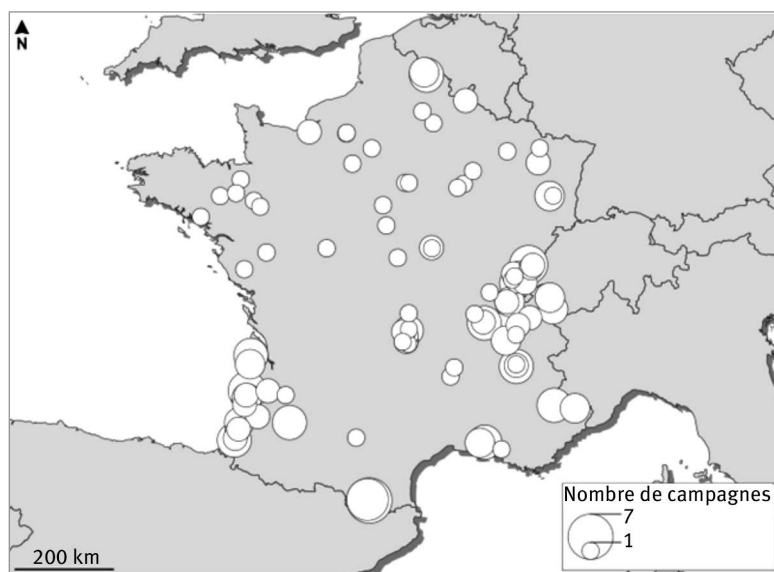
Dans ce contexte, un premier indicateur de l'état écologique des plans d'eau basé sur le phytoplancton a été développé pour la France en 2013. Il s'agit de l'indice phytoplancton lacustre (IPLAC; Feret et Laplace-Treyture, 2013; Laplace-Treyture et Feret, 2016). Cet indice multimétrique, incluant une métrique de biomasse algale (calée sur les concentrations en chlorophylle-a) et une métrique de composition spécifique (calée sur les préférences trophiques des taxons observés), permet de retranscrire l'état trophique général des plans d'eau.

Historiquement, les indices basés sur les communautés de diatomées benthiques ont été quant à eux développés pour les rivières, puis ont été appliqués tels quels aux plans d'eau par la majorité des États membres (Poikane *et al.*, 2016). Ce fut notamment le cas pour la France avec l'indice biologique diatomées (IBD). Mais le premier exercice dédié d'intercalibration européenne révéla une faible corrélation entre les valeurs de l'IBD en plan d'eau et le phosphore total (Kelly *et al.*, 2014) : de nombreux taxons lacustres étaient notamment absents de la liste des espèces clés utilisées pour le calcul de l'IBD, entraînant une faible pertinence de cet indice pour l'évaluation des plans d'eau.

Il était donc nécessaire de développer un indice diatomique dédié à ces masses d'eau. Une campagne exceptionnelle d'acquisition de données fut ainsi organisée à l'été 2015 (basée sur des recommandations précises d'échantillonnage, Morin *et al.*, 2010), et poursuivie jusqu'en 2017 dans le cadre des réseaux de surveillance de l'état écologique des plans d'eau. Une version préliminaire de l'indice a alors été proposée sur la base de ces données. La représentativité spatiale et temporelle a ensuite été accrue par des prélèvements floristiques et physico-chimiques complémentaires, entre 2018 et 2020, permettant d'obtenir une assise plus conséquente du jeu de données, et d'optimiser ainsi la sensibilité et la robustesse de l'indice. Une version stabilisée de l'indice, nommée indice biologique diatomées en plans d'eau (IBDL) a ainsi été produite en 2021 (Tison-Rosebery *et al.*, 2023).

Dans cet article, nous proposons d'illustrer *via* la présentation de l'IPLAC – basé sur le phytoplancton – et de l'IBDL – basé sur les diatomées du phytobenthos – les différents aspects liés au cycle de vie d'un indicateur biologique tel qu'exigé par la DCE, et dédié au contexte français. De son développement à son transfert aux opérateurs de terrain et acteurs de la politique publique de gestion des milieux aquatiques, le scientifique mobilise toute son expertise aux différentes étapes de ce processus afin de fournir un outil fiable et efficace. Il en assure également la mise à jour régulière afin de suivre l'évolution de la taxonomie et maintenir ainsi la pertinence des évaluations produites.

Figure 1 – Plans d'eau échantillonnés et nombre de campagnes réalisées pour l'acquisition des données biologiques mobilisées pour le développement de l'IBDL.



Construction d'un nouvel indice

Cette phase initiale de la vie d'un indicateur est ici illustrée par l'IBDL.

L'acquisition de données : une étape cruciale

Au niveau européen, selon les pays, l'échantillonnage des diatomées préalable au calcul d'un indice en milieu lacustre peut être réalisé sur substrat minéral dur ou sur substrat végétal. Nous avons donc proposé un protocole d'échantillonnage (Morin *et al.*, 2010) préconisant le prélèvement sur les deux types de substrats lors des campagnes dédiées à la mise en place de l'indice, ceci afin de pouvoir *a posteriori* évaluer la possibilité d'échantillonner exclusivement sur l'un des types de substrats.

Les diatomées ont ainsi été collectées durant la période estivale, chaque année de 2015 à 2020, au niveau d'unités d'observation (UO) dans 93 plans d'eau. Les UO sont définies par le protocole français d'échantillonnage des macrophytes en milieu lacustre NF T90-328 (AFNOR, 2022), le choix de prélever les diatomées à cette échelle permettant de combiner ultérieurement les évaluations fournies par ces deux maillons biologiques, tel que préconisé par la DCE.

Des données biotiques et abiotiques complètes ont été obtenues pour 1 021 échantillons (figure 1). Des données floristiques correspondant aux deux types de substrat échantillonnés étaient disponibles pour 732 UO. Au total 1 091 taxons ont été dénombrés, dont 10 % au niveau du genre.

Quelle méthode utiliser à partir des données récoltées ?

Les données abiotiques ont révélé des gradients de pression discontinus, avec une sous-représentation de données issues de lacs en mauvaise condition écologique. Cette situation relativement commune, soulignée par plusieurs auteurs en charge de la mise au point d'indices biologiques (Bennion *et al.*, 2014), rend difficile la construction de profils écologiques fiables pour les taxons présents.

Dans l'optique de proposer un indice multimétrique et compte tenu de la spécificité des gradients environnementaux relevés, nous avons opté pour la méthode d'analyse nommée « *Threshold Indicator Taxa Analysis* » ou TITAN (Baker *et al.*, 2010). Associant l'identification de seuils de rupture dans les communautés à la détermination de taxons indicateurs, cette méthode permet de constituer une liste définie de taxons d'alerte selon la variable environnementale considérée, et de pallier ainsi la discontinuité du gradient environnemental au sein de nos données. TITAN présente également l'avantage de prendre en compte les taxons ayant une faible occurrence et/ou une faible abondance.

L'indice biologique diatomées en plans d'eau, un indice applicable à tout type de plan d'eau

En utilisant cette méthode, nous avons construit un indice multimétrique basé sur quatre gradients de pression (phosphore total, azote Kjeldahl, matières en suspension, demande biologique en oxygène) et 590 taxons indiciaires dont 121 taxons d'alerte.

Si l'on compare pour un même plan d'eau les évaluations données par l'IBDL et l'IBML (indice biologique macrophytes en lacs), il est intéressant de noter que

l'IBDL apparaît généralement moins déclassant (pour 18 échantillons sur 22). La littérature comparant les résultats de différents indices lacustres, bien que rare, converge en effet vers une surestimation de la qualité de l'eau par les diatomées. Ainsi les indices basés sur les diatomées peinent généralement à détecter de nouveaux plans d'eau impactés, qui n'auraient pas été déjà détectés par les indices macrophytiques (Kolada *et al.*, 2016).

Pourtant, la réponse rapide du phytobenthos aux conditions du milieu justifie leur utilisation en routine (Schneider *et al.*, 2019) en tant qu'alertes précoces de toute perturbation environnementale.

D'autre part, nos résultats montrent que les valeurs des métriques d'IBDL calculées à partir des listes de taxons échantillonnés sur des substrats minéraux ou sur des macrophytes pour une même UO convergent. Les résultats d'IBDL sont donc directement comparables quel que soit le substrat échantillonné. Cet aspect les rend incontournables lorsque les pressions hydrologiques dans les zones littorales lacustres limitent le développement des macrophytes, du fait notamment d'une amplitude du marnage annuel trop élevée (estimée à partir de 2 m) pour garantir leur développement. De plus, le calcul d'IBML peut être irréalisable pour les plans d'eau dont les communautés de macrophytes sont naturellement pauvres en espèces, voire absentes (Schneider *et al.*, 2019). L'IBDL peut quant à lui être mis en œuvre dans tout type de plans d'eau.

Révisions d'un indice existant

Les performances et la robustesse d'un indicateur DCE dépendent fortement de nombreux paramètres, qu'il s'agisse par exemple de facteurs humains liés à l'acquisition des données (prélèvements, dénombrements, identifications taxonomiques) ou de facteurs statistiques, reliés aux approches choisies et au jeu de données ayant permis le développement de l'indicateur. L'IBDL et l'IPLAC sont ainsi calculés à partir d'une liste de taxons de référence, pour lesquels l'écologie a pu être décrite à partir des données disponibles lors de la phase de développement. Cependant, la taxonomie de ces taxons n'est pas figée dans le temps. Face à l'évolution de la taxonomie, il peut donc s'avérer pertinent de réaliser des mises à jour, afin de mieux prendre en compte cette évolution ainsi que les nouvelles données acquises. Cette étape de révision est ici illustrée pour l'indicateur le plus ancien, l'IPLAC.

Pour l'IPLAC, une baisse régulière et continue de la contributivité des communautés phytoplanctoniques, c'est-à-dire de la proportion des taxons pris en compte dans les calculs, est ainsi observée depuis la fin du développement de l'indicateur, à raison d'une baisse d'environ 1 % par an. Au long terme, cette baisse pourrait limiter les performances et la pertinence de cet indicateur. Une révision de cet indicateur a ainsi été menée en 2024. Elle a permis de remonter la contributivité, en passant d'environ 40 % à plus de 60 % des taxons identifiés pris en compte dans l'indice (figure 2), tout en conservant des performances similaires quant à la capacité de l'indice à représenter le niveau trophique des lacs. La part des espèces identifiées et prises en compte dans l'indice a aussi fortement augmenté passant de 60 % à près de 100 %.

Cette révision a aussi permis de mieux décrire l'écologie de nombreux taxons, grâce à la multiplication des données disponibles permettant cette description. Pour certains taxons, dont les profils avaient été décrits sur la base de leur présence dans un petit nombre de lacs et d'années, cette révision a mené à des changements radicaux, mais plus réalistes, de la description de leurs préférences trophiques (figure 3). Par exemple, la cyanobactérie *Aphanocapsa elachista*, qui était auparavant considérée comme indicatrice de lacs hyper-eutrophes, présente des préférences plus mésotrophes après révision (cf. le point vert sur la figure 3). À l'opposé, l'algue verte *Lemmermannia triangularis* présentait avant la révi-

Figure 2 – Comparaison de la richesse relative des taxons contributifs (%) de l'IPLAC, révisé ou non, par rapport à la richesse totale de l'ensemble des taxons quantifiés, respectivement pour 1907 et 1946 échantillons.

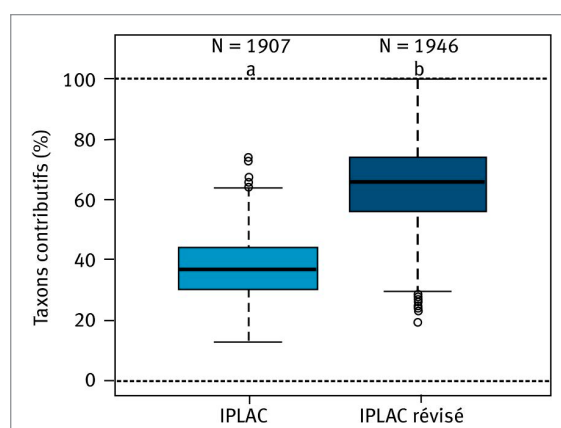
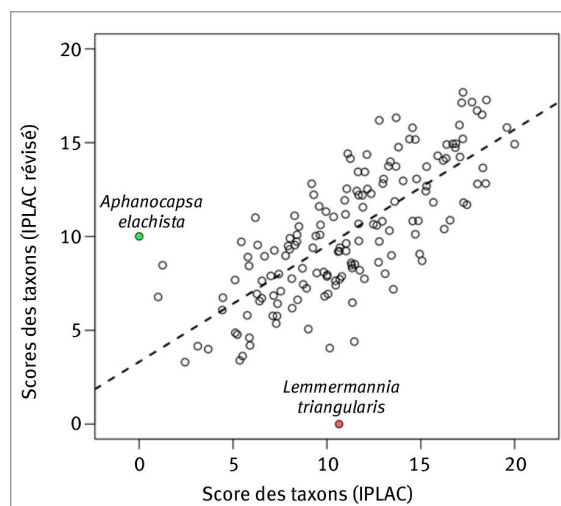


Figure 3 – Comparaison des préférences trophiques des taxons contributifs pour la méthode IPLAC originale et pour la méthode révisée. Ces préférences sont exprimées sous la forme de scores compris entre 0 et 20, respectivement pour des taxons retrouvés dans des milieux hyper-eutrophes à oligotrophes. S = 160 taxons. Deux taxons sont mis en avant sur ce graphique (respectivement la cyanobactérie *Aphanocapsa elachista*, représentée avec un point vert, et l'algue verte *Lemmermannia triangularis*, représentée avec un point rouge) afin d'illustrer que la révision de l'IPLAC a pu mener à des changements conséquents des scores de certains taxons.



sion un score proche de 10, indiquant des préférences pour des conditions mésotrophes, et elle présente maintenant un score égal à zéro, indiquant ainsi qu'il s'agit du taxon retrouvé de fait dans les conditions les plus eutrophes du jeu de données (cf. le point rouge sur la figure 3).

Intercalibration européenne des méthodes et résultats d'indices

L'intercalibration européenne consiste à valider la compatibilité des méthodes d'évaluation utilisées par les différents États membres, d'harmoniser et d'ajuster le type de résultats et les valeurs qu'elles fournissent. Pour une pression équivalente, les méthodes des différents États membres doivent fournir un résultat comparable en niveau d'évaluation (niveau d'état écologique). Le processus d'intercalibration de l'IBDL est ici explicité.

Fixation des seuils d'état écologique

L'évaluation de l'état écologique d'une masse d'eau s'exprime en ratio de qualité écologique (EQR), défini comme l'état observé par rapport à l'état de référence. L'échelle des EQR est divisée en cinq classes (très bon, bon, moyen, médiocre et mauvais état écologique ; figure 4). L'état de référence est dérivé des évaluations obtenues sur les plans d'eau de référence, considérés comme exempts de pression humaine significative¹.

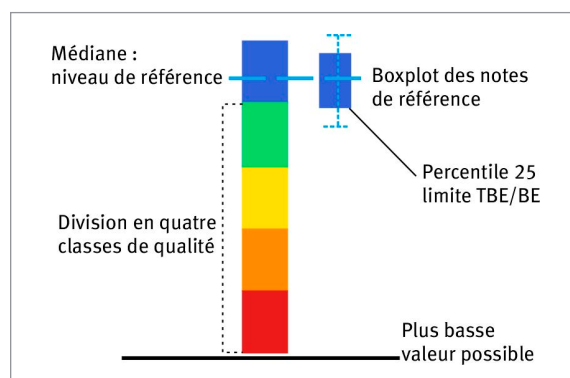
La limite très bon état/bon état a été fixée au 25^e percentile des notes de référence, selon la technique la plus communément adoptée par les pays membres participant à l'exercice d'intercalibration. Les limites inférieures ont été obtenues par divisions en parts égales du reste de la distribution.

Les différents seuils d'état écologique proposés, exprimés en EQR pour l'indice biologique diatomées en lacs (IBDL), sont reportés dans le tableau 1.

Tableau 1 – Seuils d'état écologique exprimés en EQR, pour l'IBDL.

Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
[1-0,8[	[0,8-0,6[	[0,6-0,4[	[0,4-0,2[	[0,2-0]

Figure 4 – Principe de mise en place d'une grille d'évaluation de l'état écologique à partir des valeurs obtenues de métrique (TBE: très bon état ; BE: bon état). Très bon, bon, moyen, médiocre et mauvais état écologique sont respectivement représentés en bleu, vert, jaune, orange et rouge.



Intercalibration des seuils d'état écologique et potentiel impact sur l'état des lieux

Les seuils très bon et bon doivent être intercalibrés entre États membres, afin de vérifier que notre système d'évaluation est compatible avec le standard européen (« common view »). La très bonne corrélation entre les scores d'IBDL et le gradient de phosphore total (R^2 de 0,64 à 0,81 selon le type de lac considéré, avec une p value $< 0,001$), critère clé pour considérer l'indice comme prêt à être intégré dans le processus (Kelly *et al.*, 2014), a permis de mener l'exercice d'intercalibration. Cet exercice a abouti à la validation de nos seuils d'état écologique.

L'IBDL a ainsi intégré le panel d'indicateurs mobilisés pour la surveillance et l'évaluation des plans d'eau français. Le comité national de pilotage (CNP), qui réunit les directeurs des DREALs et DEALs², des Agences et Offices de l'eau, de l'Office français de la biodiversité et de la Direction de l'eau et de la biodiversité, a commandité une étude d'impact pour évaluer l'influence de l'ajout de ce nouvel indicateur sur le taux de masses d'eau en bon état/bon potentiel écologique puis a consécutivement validé la révision de l'arrêté d'évaluation.

Transfert aux utilisateurs

Le transfert opérationnel de ces méthodes vers les acteurs de la surveillance de l'état écologique des plans d'eau nécessite de standardiser les techniques de prélèvement des microalgues et les techniques de calcul des indices. Normes, formations, bases de données et scripts de calcul ont donc été produits et mis à disposition des acteurs de la gestion des milieux aquatiques.

Normes d'échantillonnage

La norme en vigueur NF T90-354 « Qualité de l'eau – Échantillonnage, traitement et analyse de diatomées benthiques en cours d'eau et canaux » (AFNOR, 2016) est actuellement en cours de révision afin d'intégrer les préconisations de prélèvement de ces microalgues en plans d'eau, ce qui facilitera la mise en œuvre de l'IBDL. Pour la mise en œuvre de l'IPLAC, la norme expérimentale, XP T90-719 « Qualité de l'eau – Échantillonnage du phytoplancton dans les eaux intérieures » (AFNOR, 2017) a été développée spécifiquement pour définir la méthode d'échantillonnage. Elle devrait être révisée dans les prochains mois, dans le cadre de la révision systématique, pour passer de norme expérimentale à norme valide. Elle est complétée par la norme européenne NF EN 15-204 (AFNOR, 2006) qui définit les règles de dénombrement du phytoplancton par microscopie inversée. Cette dernière est associée à un fascicule de documentation publié en 2024, FD T90-779 (AFNOR, 2024) qui en précise spécifiquement pour la France certaines modalités de mise en œuvre.

1. La liste des lacs de référence a été établie à partir de la circulaire DE/MAGE/BEMA 04/N 18 n° 2004-08 DCE du 23/12/04 relative à la constitution et la mise en œuvre du réseau de sites de référence pour les eaux douces de surface en application de la DCE.

2. Les directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) et directions de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DEAL) dans les départements et régions d'outre-mer.

Formation des opérateurs

En partenariat avec l'Office français de la biodiversité, les acteurs en charge des prélèvements de diatomées lacustres ont été formés en amont de la mise en place de la campagne exceptionnelle d'acquisition des données, dédiée au développement de l'IBDL.

Une formation dédiée aux évaluateurs Cofrac³ sur la méthode de prélèvement du phytoplancton a été mise en œuvre en 2016. Des formations à l'identification du phytoplancton ont aussi été mises en place afin d'augmenter les compétences des taxonomistes des laboratoires et de leur transmettre des connaissances sur l'indicateur IPLAC et son calcul avec le logiciel Phytobs (voir ci-dessous).

Mise à disposition des scripts et des bases de données

La base de données utilisée pour le développement de l'IBDL, ainsi que le script du programme permettant le calcul de cet indice sous le logiciel R sont libres d'accès et disponibles sur le site <https://doi.org/10.57745/PDKBGB>. Il est également possible de calculer les indices, IBDL et IPLAC, via le portail de l'évaluation des eaux (<https://seee.eaufrance.fr/>).

Logiciels

Pour la surveillance du phytoplancton, il a été développé dès 2009 un logiciel libre (Laplace-Treytore *et al.*, 2017), nommé Phytobs qui peut être téléchargé depuis la page dédiée (<https://hydrobio-dce.hub.inrae.fr/telecharger/logiciels/phytobs>). Il assiste l'opérateur pour le dénombre-

ment au microscope, permet la bancarisation et le transfert des données selon le Schéma national des données sur l'eau (SNDE) et permet le calcul de l'indice IPLAC et son exploitation. Il fait l'objet de mises à jour régulières (annuelles) pour tenir compte de l'évolution de la taxonomie et répondre aux attentes des utilisateurs. L'IPLAC, dans sa version révisée, y sera implémenté prochainement.

Conclusion

Au sein du Pôle R&D ECLA (Pôle Recherche et Développement Écosystèmes Lacustres)⁴, chercheurs, techniciens et ingénieurs collaborent afin de développer les outils de biosurveillance exigés par la directive cadre sur l'eau. La France s'est ainsi dotée d'indices performants basés sur les flores phytobenthiques et phytoplanctoniques des plans d'eau. Les équipes travaillent également à faire vivre ces méthodes, en formant les acteurs de la gestion de l'eau à leur application, et en veillant à leur mise à jour régulière dans un contexte où les changements globaux impactent significativement la dynamique temporelle des communautés. Aujourd'hui, face aux difficultés d'identification des taxons par microscopie traditionnelle, méthode chronophage et exigeante sur le plan de la systématique, des travaux explorent le potentiel du métabarcoding ou de la reconnaissance automatisée d'images comme alternatives, ou compléments, à l'analyse morphologique des microalgues pour la surveillance des plans d'eau. ■

3. Comité français d'accréditation.

4. <https://poleecla.fr/>

EN SAVOIR PLUS...

Afin d'obtenir davantage de précisions sur les aspects méthodologiques liés au développement de l'IBDL, il est possible de se reporter à la publication : Tison-Rosebery, J., Boutry, S., Bertrin, V., Leboucher, T., & Morin, S. (2023). A new diatom-based multimetric index to assess lake ecological status. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(10), 1202. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11855-w>

La méthode mise en œuvre pour la révision de l'IPLAC est détaillée dans le rapport : Meyer, A. & Laplace-Treytore, C. (2024). *Révision de l'indice Phytoplancton Lacustre (IPLAC) : refonte des notes spécifiques - Projet ReviPLAC*, <https://hal.inrae.fr/hal-05136578v1>

Toutes les informations relatives à l'étude du phytoplancton en plan d'eau pour la mise en œuvre de la DCE peuvent être retrouvées sur le site Hydrobio-dce : <https://hydrobio-dce.hub.inrae.fr/methodes-dce/methodes-plans-d-eau/phytoplancton>

RÉFÉRENCES

- AFNOR. (2006). Qualité de l'eau - Norme guide pour le dénombrement du phytoplancton par microscopie inversée (méthode Utermöhl). NF EN 15204.
- AFNOR. (2016). Qualité de l'eau – Échantillonnage, traitement et analyse de diatomées benthiques en cours d'eau et canaux. Association française de normalisation, Norme NF 90 T-354.
- AFNOR. (2017). Qualité de l'eau - Échantillonnage du phytoplancton dans les eaux intérieures, XP T 90-719.
- AFNOR. (2022). Qualité de l'eau - Échantillonnage des communautés de macrophytes en plans d'eau. Norme NF T90-328.
- AFNOR. (2024). Aide à l'application de la norme NF EN 15-204: 2006, FD T90-779.
- Baker, M. E., & King, R. S. (2010). A new method for detecting and interpreting biodiversity and ecological community thresholds. *Methods in Ecology and Evolution* 1(1), 25-37. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2009.00007.x>
- Bennion, H., Kelly, M. G., Juggins, S., Yallop, M. L., Burgess, A., Jamieson, J., & Krokowski, J. (2014). Assessment of ecological status in UK lakes using benthic diatoms. *Freshwater Science*, 33(2), 639-654. <https://doi.org/10.1086/675447>
- Feret, T., & Laplace-Treytore, C. (2013). *IPLAC: L'indice Phytoplancton LACustre : Méthode de développement, description et application nationale. Rapport final*. Irstea Groupement de Bordeaux, unité de recherche Réseaux, épuration et qualité des eaux. Rapport, 69 p.
- Guiry, M. D., Guiry, G. M. (2023). *AlgaeBase*. World-wide electronic publication. National University of Ireland, Galway. <https://www.algaebase.org>.
- Kelly, M., Urbanic, G., Acs, E., Bennion, H., Bertrin, V., Burgess, A., Denys, L., Gottschalk, S., Kahlert, M., Karjalainen, S.M., Kennedy, B., Kosi, G., Marchetto, A., Morin, S., Picinska-Faltynowicz, J., Poikane, S., Rosebery, J., Schoenfelder, I., Schoenfelder, J., Varbiro, G. (2014). Comparing aspirations: intercalibration of ecological status concepts across European lakes for littoral diatoms. *Hydrobiologia*, 734, 125-141. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-1874-9>

RÉFÉRENCES (SUITE)

- Kolada, A., Pasztaleniec, A., Bielczyńska, A., & Soszka, H. (2016). Phytoplankton, macrophytes and benthic diatoms in lake classification: Consistent, congruent, redundant? Lessons learnt from WFD-compliant monitoring in Poland. *Limnologia*, 59, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2016.05.003>
- Laplace-Tretyure, C., Hadoux, E., Plaire, M., Dubertrand A., & Esmieu, P. (2017). Phytobs v3.0 : Outil de comptage du phytoplancton en laboratoire et de calcul de l'IPLAC. Version 3.0. Application JAVA. <https://hydrobio-dce.hub.inrae.fr/telecharger/logiciels/phytobs>
- Laplace-Tretyure, 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, 686-698. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.05.025>
- Morin, S., Valade, D., Tison-Rosebery, J., Bertrin, V., Cellamare, M., & Dutartre, A. (2010). *Utilisation du phytobenthos pour la bioindication en plans d'eau : État de l'art des méthodes disponibles et test de métriques sur les plans d'eau aquitains*. Rapport scientifique. Irstea. <https://hal.inrae.fr/hal-02594105v1>
- Poikane, S., Kelly, M., & Cantonati, M. (2016). Benthic algal assessment of ecological status in European lakes and rivers: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 568, 603-613. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.027>
- Schneider, S. C., Hjermann, D. O., & Edvardsen, H. (2019). Do benthic algae provide important information over and above that provided by macrophytes and phytoplankton in lake status assessment? Results from a case study in Norway. *Limnologia*, 76, 28-40. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2019.02.001>
- Stevenson, R. J., & Rollins, S. L. (2017). Ecological assessment with benthic algae. Dans G. A., Lamberti, & F. Richard Hauer, *Methods in stream ecology* (pp. 277-292). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813047-6.00015-2>
- Tison-Rosebery, J., Boutry, S., Bertrin, V., Leboucher, T., & Morin, S. (2023). A new diatom-based multimetric index to assess lake ecological status. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(10), 1202. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11855-w>
- Union Européenne (2000). Water Framework Directive. *J. Ref. OJL*, 327, 1-73.
- Wu, N., Dong, X., Liu, Y., Wang, C., Baattrup-Pedersen, A., & Riis, T. (2017). Using river microalgae as indicators for freshwater biomonitoring: Review of published research and future directions. *Ecological Indicators*, 81, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.066>