



ENJEUX SCIENCES

LES GRANDS LACS À L'ÉPREUVE DE L'ANTHROPOCÈNE

J.-M. DORIOZ, O. ANNEVILLE, I. DOMAIZON, C. GOULON, J. GUILLARD,
S. JACQUET, B. MONTUELLE, S. RASCONI, V. TRAN-KHAC, J.-P. JENNY

éditions
Quæ

LES GRANDS LACS

À L'ÉPREUVE
DE L'ANTHROPOCÈNE

JEAN-MARCEL DORIOZ, ORLANE ANNEVILLE,
ISABELLE DOMAIZON, CHLOÉ GOULON, JEAN GUILLARD,
STÉPHAN JACQUET, BERNARD MONTUELLE, SERENA RASCONI,
VIET TRAN-KHAC, JEAN-PHILIPPE JENNY

Dans la même collection

Les virus marins

Simple parasites ou acteurs majeurs des écosystèmes aquatiques ?
Stéphan Jacquet, Yves Desdevises, Anne-Claire Baudoux, Soizick Le Guyader
2023, 112 p.

Le moustique,

Ennemi public n° 1 ?

Sylvie Lecollinet, Didier Fontenille, Nonito Pagès, Anna-Bella Failloux
2022, 168 p.

Feux de végétation

Comprendre leur diversité et leur évolution

Thomas Curt, Christelle Hély, Renaud Barbero, Jean-Luc Dupuy,
Florent Mouillot, Julien Ruffault
2022, 136 p.

Les zoonoses

Gwenaël Vourc'h, François Moutou, Serge Morand, Elsa Jourdain
2020, 172 p.

Les mondes de l'agroécologie

Thierry Doré, Stéphane Bellon
2019, 176 p.

En couverture : lac Wakatipu à Queenstown, station balnéaire de la région
d'Otago, dans l'île du sud de la Nouvelle-Zélande © Jiri Foltyn/AdobeStock.

L'édition de cet ouvrage a bénéficié du soutien financier de l'UMR CARTEL
d'INRAE à Thonon-les-Bains et de la Direction pour la science ouverte (DipSO)
d'INRAE pour en permettre une diffusion large et ouverte.

Cet ouvrage est diffusé sous licence CC-by-NC-ND 4.0.

© Éditions Quæ, 2023

ISBN papier : 978-2-7592-3520-9

ISBN PDF : 978-2-7592-3521-6

ISBN epub : 978-2-7592-3522-3

ISSN : 2267-3032

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex

www.quae.com

www.quae-open.com

Sommaire

Préambule.....	4
Introduction.....	6
Les « grands lacs » : des socio-écosystèmes structurants aux échelles continentales	11
Lacs et grands lacs : définition et diversité.....	11
Organisation spatiale et fonctionnalités de l'écosystème.....	20
Des intégrateurs environnementaux généralistes.....	24
Des changements d'état particulièrement lents et durables.....	34
Une valeur essentielle pour l'humanité : les multiples services rendus par les grands lacs.....	37
Les observatoires limnologiques : des instruments indispensables.....	43
Principales dynamiques pathologiques des grands lacs	50
Les stressseurs.....	50
Les maladies de civilisation les plus courantes des grands lacs.....	55
Les trajectoires d'état : une chronique d'exposition aux stress.....	76
La restauration des grands lacs, face à la complexité des socio-écosystèmes	86
Échecs de manipulations ciblant la fonction et la biodiversité piscicole.....	87
Restaurations trophiques : succès, rémissions, échecs.....	90
Un funeste échec de gestion hydrologique : la désertification de la mer d'Aral.....	97
Nouveaux stress et nouveaux défis de gestion	100
En toile de fond : le multi-stress généralisé.....	100
Le cocktail de micropolluants : un arsenal de perturbateurs discrets et raffinés.....	102
Flux de plastiques : un multi-perturbateur démasqué.....	106
Le changement climatique, effets multiples et risque de rechute de l'eutrophisation.....	109
Les défis de la gestion lacustre.....	111
Ce qu'il faut retenir	118
Les grands lacs : aux bons soins de la limnologie.....	118
Complexité des mécanismes et des trajectoires écologiques lacustres.....	120
Quelques grandes leçons de la gestion des grands lacs.....	123
Pour conclure	129
Références bibliographiques	131



PRÉAMBULE

Le diagnostic scientifique sur l'état des grands lacs¹ mondiaux, leurs trajectoires de dégradation, leurs expositions aux menaces émergentes et les difficultés de leurs gestions, établit un bilan pessimiste de la situation actuelle de ces macro-écosystèmes. À l'issue d'un congrès tenu à Évian (*Large lakes – Small world*, 2018, ELLS-IAGLR), un groupe de chercheurs a, sur la base de ces constats, souhaité donner l'alarme dans un article intitulé « Scientists'warning to humanity: Rapid degradation of the world's large lakes » (Jenny *et al.*, 2020). Cette publication est un appel solennel, qui s'inscrit dans le mouvement Warning for Humanity initié par Ripple *et al.* (2017) et sollicitant les scientifiques pour alerter le public sur la dégradation globale des écosystèmes terrestres et aquatiques et les risques qui en résultent.

Les 42 auteurs impliqués dans cette alerte se caractérisent par la diversité de leurs zones géographiques de recherches, de leurs champs spécifiques de connaissance et de productions scientifiques, de leurs expériences de participation à des réseaux de recherche internationaux et à des observatoires ou des organisations de gestion. Le message qu'ils délivrent peut être considéré comme l'esquisse d'une expertise mondiale sur l'état et la dynamique de ces milieux.

Le présent ouvrage s'inscrit dans le prolongement de cette démarche. Il réunit en particulier les auteurs français ayant participé à l'article de Jenny *et al.* (2020), avec l'objectif de donner au public francophone des éléments de réflexion sur le niveau de dégradation des grands écosystèmes lacustres et leurs possibilités de restauration. Si le texte reprend les points les plus marquants de l'article initial pour les développer et les rapporter aux fondamentaux de la limnologie, il est surtout largement augmenté, avec de nouvelles illustrations, des approfondissements et des

1. Soient ceux d'une surface supérieure à 100 km², selon la définition de Jenny *et al.* (2020). Les raisons de ce choix sont explicitées ultérieurement dans le texte.

études de cas inédites, destinés à consolider la démonstration et à la mettre plus en prise avec les expériences de gestion.

Considérant l'urgence de faire partager une meilleure compréhension des phénomènes, l'ouvrage a une vocation didactique. Il s'adresse à tous, curieux et décideurs inclus. Bien entendu, les points de vue présentés dans cet ouvrage n'impliquent que ses dix auteurs.



INTRODUCTION

Les activités humaines poussent actuellement la plupart des écosystèmes de la planète au-delà de leurs capacités de charge écologique (Bergeron-Verville, 2013), c'est-à-dire de leurs possibilités naturelles à absorber les perturbations et à soutenir les usages (Wackernagel *et al.*, 2002). Nombre de grands lacs ont été parmi les premiers macro-écosystèmes planétaires à subir durablement ce dépassement qui caractérise l'Anthropocène (Vitousek *et al.*, 1997). La transformation, dès le début de l'ère industrielle, de l'état des eaux profondes de certains grands lacs d'Europe et d'Amérique par apparition de zones anoxiques (sans oxygène), représente l'une des premières manifestations de cette rupture écologique à des échelles continentales. Les archives sédimentaires montrent qu'en un siècle, l'absence ou le bas niveau d'oxygène (hypoxie) des eaux lacustres profondes se sont quasiment mondialisés, suivant en cela l'intensification des activités humaines et les rejets massifs de nutriments qui en résultent. Ces changements d'état couplés sont les marqueurs d'un constat très général : les relations entre les lacs, grands lacs compris, et les activités humaines se sont à tel point altérées que les impacts de celles-ci menacent souvent les fonctions primordiales de ces milieux (pêche, eau potable, biodiversité). Malgré ce diagnostic alarmant, l'idée que les grands lacs sont une ressource planétaire menacée tarde à s'imposer dans les instances de décision, à tous les niveaux (international, national, local). Paradoxalement, cette atonie perdure au moment où la communauté scientifique développe l'idée que ces masses d'eau d'échelle continentale, en bon état, seraient un atout majeur face au changement climatique.

La trajectoire des relations « grand lac-activités humaines » trouve ses racines profondément dans l'histoire et l'anthropologie. Les populations humaines et leurs activités sont de longue date attirées autour des grands lacs par une eau abondante, par diverses ressources facilement accessibles, par une situation ambivalente propice à la fois à la défense et aux échanges inter-rives, enfin par

un milieu porteur de références et de pratiques culturelles. Les grands lacs restent de nos jours, et pour des raisons inchangées, de puissants attracteurs favorisant le développement socio-économique. Il n'est donc pas étonnant qu'ils aient été les premiers grands écosystèmes massivement affectés, au ^{xx}e siècle, par l'accélération des flux environnementaux associée à une croissance démographique et économique particulièrement activée à leurs périphéries. À ces facteurs humains s'ajoutent des propriétés géographiques intrinsèques de l'objet lac, qui en font des intégrateurs de flux hydrochimiques à la fois dans le temps (le milieu est relativement confiné) et dans l'espace (ils reçoivent, en général, les flux cumulés de vastes bassins versants). C'est d'ailleurs cette concentration spatiale et temporelle des flux de phosphore qui explique que, dès les années 1950, de grands lacs aient été parmi les premières victimes du dérèglement anthropique du cycle de cet élément et de sa conséquence la plus visible, l'eutrophisation. La suite démontrera qu'il s'agissait d'un signe avant-coureur de perturbations qui prévalent actuellement à l'échelle globale.

L'environnement planétaire actuel soumet les grands lacs à bien d'autres dysfonctionnements d'origine anthropique que ceux dus aux flux de phosphore. Ils subissent en effet de multiples pressions produites par toute une gamme de stress anthropiques de natures très diverses, allant de la surpêche à l'artificialisation du littoral, au changement climatique et aux nombreux types de contaminations polluantes. Polluants métalliques, résidus phytosanitaires et médicamenteux, xénobiotiques sont les ingrédients de base du cocktail mondialisé de polluants qui inquiète les limnologues. La qualité des eaux et des milieux lacustres se dégrade en proportion des pressions subies, compromettant un peu partout les usages présents et à venir des plans d'eau. En outre, rien ne semble pouvoir limiter l'émergence régulière de nouveaux facteurs de stress dont l'impact, initialement souvent sous-évalué, se révèle par des perturbations écosystémiques déconcertantes (avec comme exemple récent, les microplastiques).

Quelques tentatives, pour desserrer certaines pressions et remédier aux dégradations les plus critiques qu'elles causent, ont vu le jour depuis les années 1980 dans les pays dits « développés » ou du « Nord », notamment en ce qui concerne l'eutrophisation.

Le but est de « restaurer » les grands lacs dans leurs fonctions environnementales et d'usages en leur permettant de retrouver une qualité des eaux et des milieux favorables à la bonne expression de celles-ci. La restauration ne consiste donc pas à tenter de revenir à un état écologique antérieur, mais à retrouver un état susceptible de porter des attentes sociétales combinant usages et préservation des milieux. Il s'agit, selon les cas considérés, soit de baisser le niveau des pollutions, en limitant les apports de nutriments ou autres polluants dépassant la capacité de charge de l'écosystème, soit de réglementer l'accès aux ressources, par exemple en mettant fin à une exploitation piscicole surdimensionnée et non durable, ou encore de réhabiliter les habitats nécessaires à la sauvegarde d'espèces emblématiques à forte valeur culturelle. Toutes ces actions représentent *de facto* des expérimentations en grandeur nature, analogues des suivis cliniques en médecine. Menées sur de grands lacs (ou des lacs plus petits²), elles sont des cas d'école pour la gestion de ressources écologiques sous pression anthropique et à des échelles continentales. Retours d'expérience, réussites, échecs, semi-échecs apportent tous des informations précieuses pour comprendre ces vastes écosystèmes, leurs dynamiques temporelles parfois surprenantes, leurs inerties, les incertitudes sur les tendances futures... et pour améliorer en conséquence les concepts et les modèles d'intervention en limnologie.

La taille des grands lacs et donc leur inertie hydro-écologique, mais aussi les composantes sociétales et politiques qui leur sont associées, rendent ces macro-systèmes particulièrement complexes à gérer, notamment dans une perspective de restauration et dans un contexte international. Cet état de fait, combiné à un peu de scepticisme sur l'urgence et la gravité des menaces évoquées précédemment, explique que, sauf exception, les grands lacs manquent d'engagements et d'actions destinées à remédier aux dégradations. Les scientifiques rédacteurs de Jenny *et al.* (2020) soulignent la redoutable contradiction entre cette inaction, la

2. Compte tenu de l'universalité des processus bioécologiques, certaines données ou concepts présentés dans cet ouvrage sont issus de données de « petits » lacs, mais transposables aux grands lacs tels que définis par Jenny *et al.* (2020).

baisse marquée de la qualité des eaux et des milieux (baisses couplées dont les causes sont bien diagnostiquées), et le besoin croissant de ces ressources lacustres pour le développement humain à venir.

Dégradations héritées d'un siècle de pressions anthropiques, multi-stress, mauvaises évaluations des risques émergents, réponse sociétale rarement à la hauteur des enjeux : telles sont les composantes du contexte général écologique et sociétal dans lequel s'inscrit cet ouvrage sur les grands lacs. L'objectif est de donner au public des éléments de réflexion sur ce qu'il faut savoir du fonctionnement, des trajectoires, des pertes d'usage et de services et des difficultés de restauration de ces socio-écosystèmes, pour envisager, face aux menaces émergentes et au changement global, la réactualisation de leur gestion.

L'ouvrage représente une réflexion collective de scientifiques de l'UMR (INRAE USMB) CARTELE (Centre alpin de recherche sur les réseaux trophiques et les écosystèmes limniques) et de son Observatoire des lacs (OLA, Rimet *et al.*, 2020). Le texte comprend, entre autres, des références renforcées au Léman, lac qui fait l'objet d'un suivi limnologique parmi les plus anciens au monde.

L'ouvrage s'organise en cinq chapitres.

Le chapitre 1 propose un fonds de connaissance fondamentale en limnologie, avec une vue d'ensemble sur l'objet grand lac, ses fonctionnements critiques, sa nature socio-écologique, les services écosystémiques rendus, les propriétés du milieu selon la qualité des eaux.

Le chapitre 2 passe en revue les pathologies qui affectent les grands lacs : quelles sont les principales menaces s'exerçant à des échelles locales et globales et qui poussent ces écosystèmes au-delà de leur capacité de charge ? Sont examinés changements climatiques, usage des sols des bassins versants, surexploitation piscicole, multi-usages, micropolluants.

Le chapitre 3 présente des études de cas et des retours d'expérience d'opérations de restauration et de sauvegarde, des succès, mais aussi des échecs ; la portée générale des résultats est discutée.

Le chapitre 4 tente, sous la forme d'une discussion générale, de tracer des perspectives pour les décennies à venir et d'envisager les possibilités, les limites des solutions de restauration et la reconfiguration de la gestion à mettre en place.

Le chapitre 5 propose une synthèse des propos et des recommandations.



LES « GRANDS LACS » : DES SOCIO-ÉCOSYSTÈMES STRUCTURANTS AUX ÉCHELLES CONTINENTALES

LACS ET GRANDS LACS : DÉFINITION ET DIVERSITÉ

Les lacs : des « îles d'eau » au sein des continents ?

Pour Alphonse Forel, fondateur à la fin du XIX^e siècle de la limnologie, science des eaux continentales, les lacs sont des « masses d'eau stagnantes, sans communication directe avec la mer, situées dans une dépression du sol fermée de tous côtés ». Le même auteur parle de façon poétique des lacs comme des « îles d'eau » pour souligner l'isolement relatif et la spécificité de ces entités naturelles.

Cent quarante ans plus tard, la Directive-cadre sur l'eau (DCE) reprend la formule « masses d'eau de surface stagnantes » pour définir administrativement les objets lacs. Pour préciser le concept, les limnologues ajoutent à la définition des traits descriptifs fonctionnels qui différencient les lacs des étangs, des mares ou des zones humides. Ainsi, pour Touchart (2002), un lac est « un plan d'eau continental, séparé de la mer, dominé par son bassin d'alimentation et développant son caractère propre dont la superficie, la profondeur et le volume sont suffisants pour provoquer une zonation, un étagement ou une régionalisation des processus limniques ». Un minimum de masse d'eau est donc nécessaire pour qu'émergent des structures et des fonctionnements de lac.

La profondeur est souvent considérée comme un critère clé du fait de son effet structurant sur l'écologie du système (Meybeck, 1995) : quelques mètres (5 à 7 m) d'eau suffisent en effet pour créer une compartimentation propre aux lacs et pour différencier une zone pélagique³, siège d'une production primaire photosynthétique à base

3. Zone pélagique : pleine eau de la zone centrale des lacs, à l'exclusion des zones de bordure et des zones de fond.

de microalgues (le phytoplancton), et une zone benthique⁴, vouée en grande partie à la biodégradation et au recyclage des éléments. Ces deux compartiments présentent des habitats et une biodiversité spécifiques, mais sont étroitement couplés par des dynamiques de cycle de vie et des dynamiques biogéochimiques (voir « Organisation spatiale et fonctionnalités de l'écosystème », p. 20).

Les « grands lacs » : une version XXL de l'hydrodynamique lacustre ?

Parmi les 300 millions de lacs de la planète, seuls certains sont reconnus comme des « grands lacs » (encadré 1). Ils le doivent par définition à une superficie au-delà du seuil minimal fixé à 500 km² par l'International Association for Great Lakes Research (IAGLR) (Herdendorf, 1982), seuil abaissé à 100 km² par Jenny *et al.* (2020) après une analyse statistique multiparamètre. Cette révision récente décerne le titre de « grand lac » à 1 709 plans d'eau mondiaux (figure 1A), un ensemble qui représente 90 % du volume lacustre planétaire. Au moins 130 millions d'humains vivent autour d'un grand lac dans la zone des 10 km périphériques (figure 1B), les rivages cumulés équivalant à un linéaire d'environ 100 000 km.

Bien que forcément arbitraires, ces seuils de surface distinguent une catégorie d'objets limniques développant, du fait de leur grande taille, des propriétés particulières sur les plans hydrodynamique et socio-écologique. La surface est choisie comme critère de typologie en raison de son importance dans le fonctionnement des systèmes lacustres. Elle exerce en effet un contrôle direct sur des fonctionnements biophysiques structurants tels que les échanges, notamment énergétiques, du plan d'eau avec son environnement atmosphérique, et sur des fonctionnements socio-économiques comme l'intensité et la gamme des usages. En outre, la surface étant significativement corrélée avec plusieurs autres paramètres décrivant la géométrie des grands lacs, dont la profondeur moyenne, elle constitue statistiquement un bon descripteur de la masse d'eau et donc du minimum de volume au-delà duquel peuvent se produire des fonctionnements hydrodynamiques spécifiques du système physique grands lacs (mouvements des masses d'eau, courants,

4. Zone benthique : fond des lacs, qu'il soit rocheux ou (souvent) sédimentaire.

vagues, etc. ; encadré 1). Or des caractéristiques aussi importantes pour l'écologie de ces milieux lacustres que le patron de distribution spatiale des nutriments ou de l'oxygène, le degré d'isolation des couches profondes (en couplage avec la profondeur) ou encore la puissance mécanique de l'eau, dépendent étroitement de cette hydrodynamique particulière (León *et al.*, 2005). C'est donc dans un champ de contraintes et de facilitations créé par la version grand lac de l'hydrodynamique lacustre que s'inscrivent les fonctionnements écosystémiques clés, production primaire, diversification des habitats, spatialisation des niches écologiques, réponse aux stress, morphogenèse du littoral et relations entre lac et activités humaines.

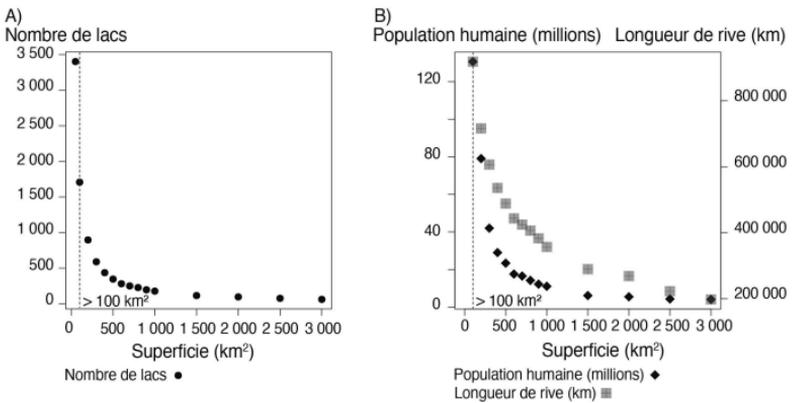


Figure 1. Distribution du nombre de lacs supérieurs à 100 km² dans le monde, lien avec la densité de la population humaine et la longueur de rive.

(A) Nombre de lacs par classe de taille (en km²), la ligne pointillée verticale indique la limite retenue (100 km²) pour la qualification de « grand lac ». (B) Densité de la population vivant en périphérie des grands lacs (à moins de 10 km) et longueur totale de la rive selon la taille des lacs (en km²) (d'après Jenny *et al.*, 2020).

Les grands lacs : 1 709 objets limniques uniques

Les grands lacs mondiaux partagent les conséquences fonctionnelles de leur taille, sans pour autant que cela n'efface la grande variabilité géométrique, historique, géographique, géochimique, biologique, etc., qui fait de chacun d'eux un objet limnique unique. Les origines géologiques (tectonique, glaciaire ou alluviale) et la position planétaire (par rapport au climat et au développement économique) organisent cette variabilité.

ENCADRÉ 1. DES LACS AUX GRANDS LACS : UNE MONTÉE EN GAMME DANS LA DYNAMIQUE DES SYSTÈMES LACUSTRES

En écologie, la taille représente un facteur de forçage susceptible de modifier de façon non linéaire, et en cascade, l'expression de grandes fonctions des écosystèmes, et de faire émerger des états et des propriétés nouvelles propres aux macro-écosystèmes (León *et al.*, 2005). Une grande taille permet des développements spécifiques en ce qui concerne les échanges avec les écosystèmes voisins et les interactions avec les processus physiques régionaux (par exemple, atmosphériques). Au sein de l'écosystème, les processus de redistribution et de stockage d'énergie et de nutriments, ainsi que les dynamiques de populations sont affectés par le facteur taille. L'influence de la taille s'étend aux relations entre biodiversité et fonctionnements écologiques, et à la réponse des écosystèmes à certains stress (Frontier et Pichod-Viale, 1995).

Les lacs n'échappent pas à ces effets. Une grande taille, en masse d'eau et en surface, démultiplie la puissance de certaines de leurs fonctions en les spatialisant et en leur donnant du temps. Elle détermine aussi l'existence de propriétés hydrodynamiques originales et structurantes pour le fonctionnement de l'écosystème.

ESPACE ET TEMPS

Les lacs, indépendamment de leur taille, sont à la fois des réceptacles, accumulateurs semi-confinés de flux hydriques et de matières associées, et des réacteurs biogéochimiques (une fonction liée au métabolisme de l'écosystème et à sa biodiversité). Les flux entrants se stockent plus ou moins longuement dans le lac, interagissent avec l'écosystème, certains des intrants s'intégrant à son fonctionnement et subissant en conséquence des transformations physiques et chimiques. Pour la plupart des lacs, l'essentiel des flux hydrochimiques et sédimentaires reçus provient, *via* leurs affluents, de leurs bassins versants.

Le couplage des fonctions réceptacle-accumulateur-réacteur est à la fois bénéfique quand il s'agit de flux de nutriments soutenant la productivité de l'écosystème sans la dérégler, et néfaste quand le couplage produit une accumulation de polluants dans le milieu et le biote. La possibilité, assez courante, d'une bioamplification*

* Concentration croissante d'un contaminant le long d'un réseau trophique. Mercure et PCB sont des cas typiques de substances bioamplifiées.

.../...

.../...

surconcentrant certains composés toxiques au sommet des réseaux trophiques de l'écosystème, accentue la part de risque écologique et sanitaire associée aux transferts entre bassin versant et lac. Les cas classiques sont la bioaccumulation de polychlorobiphényles (PCB)** ou de mercure dans certains poissons. Autre exemple de dualisme en écologie, le même processus de bioamplification est bénéfique pour le consommateur final humain si les composés accumulés dans les poissons sont des acides gras polyinsaturés produits par le phytoplancton et des bactéries.

Les lacs, petits et grands, sont donc des milieux sensibles, voire « hypersensibles », à l'anthropisation de leur environnement terrestre, car en rapport avec leur position dans la géographie du paysage :

- ils sont « surexposés » à la pollution en provenance des territoires auxquels ils sont connectés hydrologiquement ;

- ils « surexpriment » souvent les contaminations en les bioamplifiant.

La taille « grand lac » exacerbe l'expression de ces propriétés.

L'énormité de la masse d'eau et de son bassin versant donne du temps et de la puissance aux pressions de pollution et aux réponses du système. Les flux de pollution sont produits à des échelles au minimum régionales mais souvent continentales. Les temps de séjour des masses d'eau lacustres sont élevés, d'où un cumul durable des pollutions (entre la décennie et le siècle). L'équation écotoxicologique des grands lacs est donc une combinaison spécifique : haute capacité de dilution mais cumuls de polluants, notamment de micropolluants, et longues durées d'exposition de ces polluants sur un immense champ biotique multigénérationnel. La résolution de cette équation est un enjeu présent et à venir scientifique et pratique.

DYNAMIQUES ÉCOLOGIQUES

Toutes les composantes du système lacustre sont affectées par le gigantisme des grands lacs, y compris le fonctionnement écosystémique. Dans ce contexte, l'écosystème bénéficie d'un surplus d'autonomie en matière de sources d'énergie, d'éléments métaboliques et de dynamique des biocénoses***, ce qui ouvre vers plus de complexité d'organisation des réseaux trophiques.

On peut raisonnablement faire l'hypothèse, d'une part, que cette situation qui accroît les degrés de liberté du système augmente aussi sa résilience et, d'autre part, qu'en réponse aux stress, un grand lac évoluera par des dynamiques particulièrement lentes, mais difficilement réversibles une fois les dégradations d'état inscrites dans les structures écologiques.

.../...

.../...

HYDRODYNAMIQUE

Le grand lac n'est pas juste une dilatation du système petit lac avec des propriétés physiques augmentées en proportion : il présente aussi des fonctionnements hydrodynamiques particuliers et émergents susceptibles de contraindre son écologie. La principale différenciation fonctionnelle porte sur la nature et l'intensité des processus suivants (Legendre et Demers, 1984) :

- existence et structuration de véritables courants, actifs verticalement et/ou latéralement, en lien avec les vents, la rotation de la Terre, les gradients thermiques ; ces mouvements de masse se combinent pour créer des habitats et des niches écologiques différenciées ;
- formation de véritables vagues et tempêtes, une puissance mécanique de l'eau qui affecte la biodiversité de surface et assure notamment une morphologie spécifique du littoral.

Ces mouvements en masse de l'eau sont critiques par leur rôle déterminant dans le brassage des lacs, le transfert, la redistribution et le stockage de matière, d'oxygène, d'énergie et d'informations dans l'écosystème (León *et al.*, 2005 ; Frontier et Pichod-Viale, 1995). Des phénomènes aussi importants pour la dynamique de l'écosystème que la diversification et la stabilité des habitats, le degré d'isolation des couches profondes, la spatialisation des processus, l'état de l'interface terre-eau, en dépendent. L'impact probablement le plus structurant est la régénération de nutriments, comme le suggère le lien observé sur une série de lacs (grands et petits) entre taille, statuts trophiques et taux de croissance planctonique (Pinel-Alloul *et al.*, 1999 ; Guildford *et al.*, 1994).

À noter que l'existence de véritables courants n'efface pas l'hétérogénéité spatiale thermique, physico-chimique et biologique des masses d'eau, mais semble, au contraire, contribuer à créer et/ou à stabiliser des contrastes limniques, en particulier des contrastes latéraux. La coexistence de différenciations spatiales marquées au sein de la masse d'eau crée une trame diversifiée d'habitats. Il s'ensuit une expression plus étendue de la biodiversité, générant davantage de complexité dans les interactions biotiques et dans la construction des flux trophiques. Il s'ensuit également un zonage accru des usages et des nuisances, la spatialisation de ces dernières étant la compartimentation de la masse d'eau en volumes réactionnels plus réduits.

.../...

.../...

ACTIVITÉS HUMAINES

La taille « grand lac » s'accompagne en général d'une montée en gamme du système d'activités humaines associées au lac et donc de l'importance et des enjeux liés aux services écosystémiques (voir « Une valeur essentielle pour l'humanité : les multiples "services" rendus par les lacs », p. 37). Ceux-ci prennent alors souvent un caractère industriel : la navigation devient commerciale avec des infrastructures lourdes, la pêche est réalisée par des pêcheries industrielles, les pollutions du bassin versant, vu sa taille, sont couplées à des enjeux économiques à l'échelle régionale, voire continentale, ce qui complique les actions de restauration de qualité des eaux. Enfin, la gestion tend à s'institutionnaliser.

EN BREF

L'effet grand lac combine le redimensionnement de propriétés du milieu et de l'écosystème avec, au-delà de certains seuils, l'émergence de quelques mécanismes clés nouveaux, hydrologiques et écologiques, le tout dans un contexte de temps longs. Il en résulte des structurations, des comportements, des résiliences et des fonctionnements spécifiques. Toutes les composantes du système sont concernées, biocénoses, usages, relations avec le bassin versant, etc. C'est donc une montée en gamme sur de multiples caractéristiques fonctionnelles qui fait des grands lacs une catégorie particulière d'objets limniques.

** Les PCB sont des composés organiques organochlorés, majoritairement hydrophobes, qui s'accumulent dans les sédiments et dans les lipides des poissons. Bioaccumulables dans le réseau trophique, ils sont toxiques, écotoxiques et génotoxiques.

*** La biocénose est l'ensemble des êtres vivants présents dans un espace donné, comprenant leurs organisations et interactions. Le biotope et la biocénose forment l'écosystème.

Les différences d'origine correspondent souvent à des différences d'âge et, dès lors, d'histoire naturelle du lac. La moitié des grands lacs existait déjà avant la fin des dernières glaciations et le développement des civilisations humaines, parfois depuis des millions d'années. Le lac Baïkal est le plus ancien lac ; il existe depuis environ 25 millions d'années. Les grands lacs périalpins tels que le Léman (France, Suisse) ou le lac de Constance (Suisse,

Allemagne, Autriche) sont parmi les plus jeunes, entre – 10 000 et – 12 000 ans, ce qui est bref en matière d'évolution biologique.

La surface des grands lacs atteint des échelles continentales (figure 1A) jusqu'à des dizaines de milliers de kilomètres carrés (Baïkal, 31 722 km² ; Victoria, 68 100 km²). Depuis les années 1960, toute une série de grands lacs artificiels (barrages) ont été créés tels que le lac Volta (Ghana, 8 500 km²), le lac Nasser (5 250 km², Égypte, Soudan) ou encore le lac des Trois-Gorges (Chine, 1 085 km²).

Le volume total de la masse d'eau des grands lacs est toujours important (de quelques dizaines à plusieurs milliers de kilomètres cubes) et souvent associé à des profondeurs moyennes relativement élevées (en général, une centaine de mètres, jusqu'à 1 642 m pour le lac Baïkal, mais à peine 12 m pour le lac Balaton).

Les temps de séjour⁵ de l'eau sont très variables d'un lac à l'autre, mais sont généralement supérieurs à la décennie, jusqu'à quelques siècles (375 ans pour le lac Baïkal). Par sa superficie (580 km²), son volume d'eau (89 km³) et le temps de résidence de ses eaux (11 ans), le Léman, bien que le plus grand lac d'Europe occidentale, est relativement petit parmi les grands lacs (encadré 6). De fait, il n'atteint pas une échelle d'influence territoriale vraiment continentale.

Les 1 709 grands lacs sont distribués sur l'ensemble de la planète. Tous et chacun avec leurs individualités physiques s'inscrivent dans une large gamme de gradients terrestres, climatiques et écologiques, mais aussi démographiques et socio-économiques (figure 2). La place d'un lac donné dans ces gradients détermine en grande partie sa sensibilité et son degré d'exposition aux pressions d'anthropisation.

5. Temps de séjour (ou temps de rétention hydraulique) : durée nécessaire au renouvellement théorique complet de l'eau d'un lac. C'est une moyenne qui dépend du volume du lac et des flux hydriques entrants et/ou sortants et qui exprime le temps de résidence moyen de l'eau dans la cuvette lacustre.