



HAL
open science

Exploration fonctionnelle du territoire des grands lacs alpins par le prisme des services écosystémiques

Yoann Baulaz, Jean Marcel Dorioz, Véronique Peyrache-Gadeau

► To cite this version:

Yoann Baulaz, Jean Marcel Dorioz, Véronique Peyrache-Gadeau. Exploration fonctionnelle du territoire des grands lacs alpins par le prisme des services écosystémiques. Collection EDYTEM. Cahiers de géographie, 2021, Lacs et sociétés: éclairages alpins, pyrénéens et andins, 21, pp.103-126. hal-04485817

HAL Id: hal-04485817

<https://hal.science/hal-04485817>

Submitted on 1 Mar 2024

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

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

EXPLORATION FONCTIONNELLE DU TERRITOIRE DES GRANDS LACS ALPINS PAR LE PRISME DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

*FUNCTIONAL EXPLORATION OF THE TERRITORY OF THE LARGE ALPINE LAKES MOBILIZING
THE CONCEPT OF ECOSYSTEM SERVICE*

YOANN BAULAZ^{1,2}, JEAN-MARCEL DORIOZ¹ ET VÉRONIQUE PEYRACHE-GADEAU²

¹ Laboratoire CARTELE, Université Savoie Mont Blanc – INRA

² Laboratoire EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc – CNRS, Université Grenoble Alpes

yoann.baulaz@gmail.com

RÉSUMÉ

Les services écosystémiques (SE) des grands types d'écosystèmes, comme les forêts, agrosystèmes ou récifs coralliens, ont été largement décrits, avec la proposition de méthodologies spécifiques, mais peu d'études se sont intéressées à modéliser les différents services des grands lacs. Les lacs représentent pourtant l'une des principales sources d'eau douce, constituent des lieux de pêche, d'implantation des sociétés, des espaces de loisirs et de bien-être.

Dans le cadre de notre étude, l'approche choisie est essentiellement géographique, plaçant au cœur de la modélisation conceptuelle la problématique spatiale et l'analyse des relations entre la qualité de l'eau et les services écosystémiques. Nous avons adapté à l'étude des SE rendus par les grands lacs alpins français (lac d'Annecy, lac du Bourget) et le Léman, l'un des modèles les plus utilisés pour caractériser les services : le modèle de la cascade (Potschin et Haines-Young, 2011). Ce modèle facilite l'identification et la caractérisation des variables-clefs écologiques, socio-économiques et techniques qui modifient le niveau des services rendus par les lacs, tout en mettant en lumière les interactions, rétroactions et chaînes causales associant les lacs à la société.

Notre réflexion est une contribution à une nouvelle approche d'étude des territoires limniques, mobilisant le concept de service écosystémique en tant qu'outil de dialogue entre sciences et société. Le concept de SE invite dans l'immédiat à questionner les observatoires actuels de suivi des grands lacs qui sont centrés sur des indicateurs biophysiques (bioindication et flux hydrochimiques) pour qu'ils évoluent dans une approche plus systémique et intégrée, mieux adaptée pour répondre aux enjeux croisés du réchauffement climatique, de l'impact des micropolluants et pour anticiper les évolutions sociétales à venir.

MOTS-CLÉS : SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES, GRAND LAC, ACCESSIBILITÉ AUX SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES, TERRITOIRE LIMNIQUE, MODÈLE EN CASCADE DES SERVICES

ABSTRACT

The ecosystem service (ES) of the main ecosystem types such as forests, agrosystems and coral reefs are well-described, and specific methodologies have been proposed. Yet, few studies have focused on modelling the different categories of large lakes services. Lakes represent one of the most important sources of fresh water, setting up of the societies, provide spaces for fishing, leisure, physical and even spiritual well-being.

The chosen approach here is essentially geographic, placing spatial issues and the analysis of relationships between water quality and ecosystem services at the heart of conceptual modelling. We have adapted one of the most used models to characterize services, the cascade model (Potschin and Haines-Young, 2011), to the study of ES rendered by the French large Alpine lakes (Lake Annecy, Lake Bourget) and Lake Geneva. This model facilitates the identification and characterization of ecological, socio-economic and technical variables that modify the level of services provided by lakes, while highlighting the interactions, feedbacks and causal chains associating lakes to society.

Our reflection is a contribution to a new approach to study "limnic territories", by enlisting the ES concept as a tool of dialogue between science and society. The concept of ES immediately invites us to question the current observatory systems for large lakes monitoring. These systems are actually oriented towards biophysical indicators (bioindication and hydrochemical flows), yet could evolve into a systemic and integrated approach, which would be better suited to respond to major issues at the crossroads of global warming, micropollutants, and to anticipate future societal changes.

KEYWORDS: ECOSYSTEM SERVICE, LARGE LAKE, ACCESSIBILITY TO ECOSYSTEM SERVICES, CASCADE MODEL OF SERVICES

INTRODUCTION

Le concept de service écosystémique (SE) est considéré comme un «*concept d'interface*» (Amigues et Chevassus-au-Louis, 2011), faisant appel à des compétences issues de plusieurs disciplines pour étudier les bénéfices rendus par les écosystèmes pour le bien-être humain (MEA, 2005). Ce concept rappelle que la vie humaine est dépendante du fonctionnement des écosystèmes et il fournit des outils pour analyser cette dépendance.

Décrire des SE suppose, quels que soient le système étudié et l'échelle, de révéler les chaînes causales associant les dynamiques écologiques aux usages et à la recherche de biens et valeurs matérielles et immatérielles par les acteurs qui exploitent les ressources naturelles. L'enjeu scientifique est d'intégrer, dans une représentation modélisée, des connaissances traitant à la fois de fonctionnalités des écosystèmes et des systèmes socio-économiques, impliquant une association de champs disciplinaires différents sur l'étude d'un même objet. Ce faisant, le concept peut répondre aux objectifs de l'interdisciplinarité (Arnauld de Sartre *et al.*, 2015).

Le concept de SE a déjà été largement utilisé pour : (1) évaluer l'état et les tendances d'évolution des écosystèmes et leurs SE (ex. : MEA, 2005), (2) étudier la capacité de production des services par les grands types d'écosystèmes de la planète (ex. : Costanza *et al.*, 2007), (3) identifier la valeur monétaire des capitaux naturels (ex. : TEEB, 2010), (4) informer la gestion et la prise de décision (ex. : IPBES, 2018a), (5) de façon plus générale, analyser le fonctionnement des relations humain – nature (ex. : Ostrom, 2009).

Le nombre important de publications portées par des scientifiques de différentes disciplines et traitant, depuis le début des années 2000, des SE (figure 1) confirme l'intégration de ce concept à de nombreux projets de recherche en environnement et des moyens alloués à son application (Hackbart *et al.*, 2017). L'attention particulière de ce concept inclut également des controverses sur le fond mettant en cause la légitimité de ce type d'approche (Maris, 2018), sur les difficultés pour uniformiser les méthodes d'évaluation des SE et sur la variabilité des approches selon les disciplines (Barnaud *et al.*, 2011 ; La Notte *et al.*, 2017).

Au total et en quelques décennies, ce concept à la croisée des sciences naturelles et humaines est devenu un point de convergence et de débat sur la conservation de l'environnement et la manière de penser les relations humain – nature entre des écoles de pensées très variées. Cela intègre également des confrontations débordant hors de la communauté scientifique environnementaliste (Roche *et al.*, 2016). Bien qu'incomplètement stabilisé d'un point de

vue méthodologique et conceptuel (La Notte *et al.*, 2017), le concept de SE a en effet reçu une attention particulière pour des applications concrètes dans les domaines du droit de l'environnement, des sciences politiques et de l'aménagement des territoires en France et à l'international (Méral et Pesche, 2016). Parallèlement, il a été souvent mobilisé comme outil de communication sur les ressources naturelles, leur gestion et dans le but de vulgariser les travaux scientifiques. Ce succès à l'interface entre sciences et société, s'explique par la «*valeur pédagogique*» du concept due à la fois (1) à une formulation réussie juxtaposant deux idées très évocatrices, celle de «*service*» et celle «*d'écosystème*», formant un tout facilement associable à la gestion et à la conservation des ressources naturelles (Amigues et Chevassus-au-Louis, 2011) et (2) à la mise en lumière médiatique de cas concrets exemplaires et retentissants à l'échelle globale, nationale ou locale (Costanza *et al.*, 1997 ; Burkhard et Maes, 2017 ; EFESE, 2019), l'évaluation monétaire de certains services, comme la pollinisation (TEEB, 2010) ou (3) l'élaboration d'instruments favorables à la préservation de l'environnement (ex. : les paiements pour services environnementaux – SERENA, 2012).

Cette intense activité de recherche et le développement d'applications du concept de SE se sont développés en privilégiant l'étude d'écosystèmes ou anthropo-écosystèmes terrestres considérés comme des références (ex. : agrosystèmes, écosystèmes forestiers) ou particulièrement menacés dans leurs fonctions planétaires et/ou leur biodiversité exceptionnelle (ex. : récifs coralliens, mangroves) (Van der Ploeg *et al.*, 2010 ; Costanza *et al.*, 2017). Les études sur les SE des écosystèmes aquatiques se sont développées tardivement, principalement à partir de 2008 (figure 1 - Hackbart *et al.*, 2017 ; Aznar-Sánchez *et al.*, 2019) avec une impasse relative sur les SE des grands lacs. Un article paru début 2020 dans la revue *Ecosystem Services* répond en partie à ce manque, et place la caractérisation des SE des «*très grands lacs*» et leur préservation comme des enjeux mondiaux (Sturner *et al.*, 2020). Jenny *et al.* (2020), dans le cadre d'une alerte pour l'humanité relative à l'état des grands lacs dans le monde (Warning for Humanity), aboutissent au même constat.

Suivant les mêmes tendances générales des études sur les SE, l'approche monétaire domine en ce qui concerne les types d'évaluations produites pour caractériser les SE des écosystèmes aquatiques (Hackbart *et al.*, 2017). Ainsi, selon De Groot *et al.* (2012) et Costanza *et al.* (2014), les lacs, réservoirs et rivières (la plupart des évaluations ne différencient

pas les lacs, des grands lacs et rivières) fournissent une valeur globale, tous services solvables confondus, estimée à 2,5 trillions de \$US/an.

Les approches intégrées évaluant services matériels et immatériels, agrégeant donc des données qualitatives et quantitatives et croisant des références entre sciences environnementales et sciences humaines et sociales, sont moins développées (Castro *et al.*, 2014). Or, c'est bien la co-évaluation de la capacité des écosystèmes à fournir des SE aquatiques et des besoins sociétaux en contexte lacustre, et de leurs interactions qui doit être entreprise pour prendre en compte la réalité des enjeux. Les approches intégrées accordent véritablement de l'importance aux chaînes causales associant processus écologiques et socio-économiques complexes qui sous-tendent les rapports sociétés – écosystèmes. Analysant les liens entre les systèmes naturels et les sociétés humaines qui les utilisent et les

gèrent, elles sont forcément portées par des équipes pluridisciplinaires (Amigues et Chevassus-au-Louis, 2011), démarche que nous promovons dans cet article, au travers d'une caractérisation des services rendus par les grands lacs alpins.

Notre objectif est de proposer une démarche conceptuelle de caractérisation des SE des grands lacs à partir du cas des grands lacs alpins français (lac d'Annecy, lac du Bourget) et du Léman. Nous nous inspirons de la littérature existante sur les SE, pour proposer un cadre d'étude qui puisse être reproductible à d'autres grands lacs et compatible avec les principales évaluations des SE. Le développement du modèle à partir des grands lacs alpins français apporte des données quantitatives et qualitatives sur les SE de ce type d'écosystèmes emblématiques et bien connus au plan limnologique. La portée générale de ce modèle et son intérêt opérationnel seront abordés en discussion.

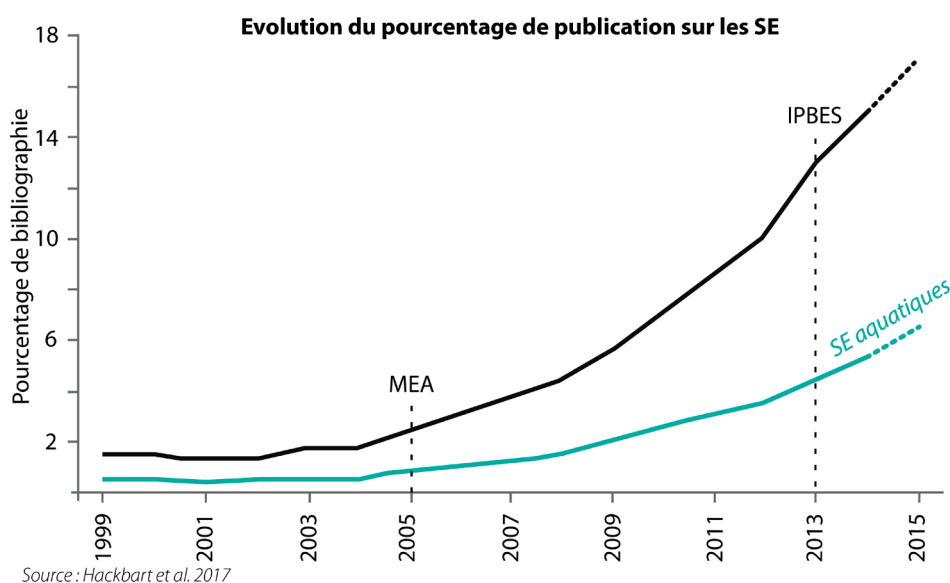


Figure 1 – Évolution de la proportion de publications sur les SE aquatiques depuis 1999 par rapport à l'ensemble des publications portant sur les SE dans la littérature anglophone scientifique réalisée par Hackbart et al., 2017 (18 413 articles identifiés dans Institute for Scientific Information – ISI Web of Science et Scopus entre 1960 et 2015, sur la base d'une recherche d'un ensemble de termes utilisés pour qualifier les SE). La ligne noire représente la proportion d'articles publiés associant les termes de SE à la thématique de l'eau (tous écosystèmes confondus) et la ligne colorée représente le nombre d'études visant spécifiquement à étudier les SE fournis par des écosystèmes aquatiques.

I – LES SPÉCIFICITÉS DU SYSTÈME ÉCOLOGIQUE ET HUMAIN ÉTUDIÉ

Notre recherche se développe à partir de deux constats et hypothèses liés : 1) le manque de références concernant les grands lacs, objets restant à définir au plan géographique et sociétal, et 2) la nécessité de disposer d'un cadre conceptuel spécifique d'étude des SE, adapté à cet objet et la possibilité de le construire à partir d'un modèle existant.

Sur ce manque de références définissant les grands lacs, objets pourtant emblématiques de la science écologique (qui leur doit l'émergence du concept d'écosystème – Forbes en 1887; Lindeman en 1942 – et l'étude de grandes problématiques de pollution dans l'anthropocène – Carpenter et Cottingham, 1997) et de l'imaginaire associé à l'élément liquide (Bachelard, 1942), la difficulté tient peut-être à la nature de ces objets, à l'interface entre un système biophysique et un système socio-économique entremêlés à l'amont dans le bassin-versant (BV) et à l'aval. Il n'existe pas non plus de définition spécifique de «grands lacs», ceux-ci se distinguant par des critères surfaciques pour les différencier des «petits». Ces critères évoluent selon l'échelle (mondiale ou continentale) et les objectifs des études – ex. : 500 km² selon l'*International Association for Great Lakes Research* - www.iaqlr.org –; 100 km² pour d'autres études menées à l'échelle mondiale – Jenny *et al.* (2020), ou supérieurs à 10 km² pour ce qui est de l'échelle des Alpes selon Magni et Chinaglia (2007). Ces objets restent donc à définir. Les lacs sont avant tout considérés comme des entités biophysiques dans leurs définitions (Forel, 1904; Touchart, 2000). Pourtant ils sont largement influencés par les sociétés qui vivent autour et inversement, ils entraînent une organisation spécifique de l'aménagement du territoire et des activités humaines et la plupart des grands lacs représentent des espaces de concentration des sociétés (Vernex, 1998), voire d'attractivité (Cristofini *et al.*, 1989). En effet, de nombreux processus lacustres sont liés à la nature et à l'intensité des flux transférés depuis le BV, notamment en matières polluantes diffuses et ponctuelles, conditionnés par les modes d'usage des sols (Likens, 1984). Ces apports sont des forçages majeurs pour la dynamique écosystémique d'un lac : ils conditionnent le temps de séjour de l'eau, déterminent sa composition physico-chimique, son état trophique, modifient sa biologie ou encore régulent la température et les courants (Pourriot et Meybeck, 1995). En conséquence, les apports en eau et en matières qui entrent dans un lac sont déterminants pour la production de biens et services, ils conditionnent la nature des relations entre les écosystèmes lacustres et les sociétés et doivent être pris en compte dans toute étude des SE des grands lacs (Moss, 2008). Par ailleurs, la dépendance des sociétés

humaines aux grands lacs ne se limite pas aux limites physiques d'un lac et de son BV, mais s'inscrit dans un espace bien plus vaste, le territoire limnique (Bartout et Touchart, 2017) dont l'aire d'influence peut s'étendre à une échelle régionale (Carpenter *et al.*, 2007). Bien comprendre et modéliser la dynamique d'un grand lac et de son BV à des fins de gestion, suppose donc de comprendre autant le fonctionnement des structures sociales, économiques et institutionnelles et les modèles de relations qui les associent spatialement au lac (informations, économies, perception des parties prenantes), que les fonctionnements biophysiques et les flux qui en résultent (eau, matières, énergie).

Cette approche peut être développée par une étude des SE des grands lacs, permettant d'envisager les relations multiples entre les écosystèmes lacustres et la société et ainsi considérer le territoire limnique globalement comme un ensemble influençant et influencé par le plan d'eau. Par cette approche, il est notamment possible d'évaluer les effets des perturbations anthropiques générées dans le BV et de l'exploitation des SE sur ces écosystèmes et sur la société qui en dépend (Keeler *et al.*, 2012). Nous apporterons des informations pour y parvenir tout au long de cet article, informations qui pourraient aider à dépasser le cadre actuel de gestion des grands lacs, centré sur un suivi des flux hydrologiques entre le BV et le lac (Bartout et Touchart, 2017), voire participer à une redéfinition des lacs et grands lacs en incluant des critères sociétaux.

1 – Présentation du modèle de la cascade et de ses composantes

Bien que le concept de SE repose sur une idée *a priori* simple que les écosystèmes «*rendent service*» aux humains, son utilisation est complexe car il suppose d'intégrer différentes formes de connaissances de disciplines diverses, d'acteurs et usagers des écosystèmes. Afin de structurer les informations multiples nécessaires à l'étude des SE et à leur mise en relation, il est nécessaire de faire appel à un cadre conceptuel ou modèle (Nahlik *et al.*, 2012).

La modélisation que nous proposons vise à considérer les spécificités des écosystèmes lacustres dans l'évaluation. L'approche choisie est alors essentiellement géographique, plaçant au cœur de la modélisation conceptuelle la problématique spatiale et l'analyse des relations entre SE et qualité des eaux. Cette finalité de notre étude répond à un manque important identifié dans la littérature sur les SE des grands lacs (Steinman *et al.*, 2017; Sterner *et al.*, 2020) et nous amène à rapprocher la géographie physique (par

la limnologie – Forel, 1904) et la géographie sociale dans une démarche globale d'étude pluridisciplinaire des territoires limniques par le prisme des SE.

Afin d'appliquer cette démarche et mettre en place la modélisation conceptuelle sur les grands lacs alpins, il est possible de mobiliser l'un des cadres conceptuels les plus compréhensifs, complets et des plus utilisés aujourd'hui pour caractériser les SE : le «*modèle de la cascade*» de Potschin et Haines-Young (2011). L'image de la cascade évoque la représentation des relations entre les différents éléments impliqués dans la chaîne de production des services associant les écosystèmes à la société. Les processus et structures biophysiques sont ainsi des constituants des fonctions écosystémiques, qui elles-mêmes fournissent des services générant des bénéfices qui profitent à des bénéficiaires. Ce modèle est intéressant car de par sa structure, il permet d'organiser la recherche de manière structurée et est compatible avec une approche d'évaluation intégrée (Van Oudenhoven *et al.*, 2012). Il représente classiquement les SE comme une interface entre le fonctionnement des écosystèmes et la société : il distingue les systèmes naturels, qui déterminent la capacité d'un écosystème à fournir des SE, et le système socio-économique, qui représente l'ensemble des bénéfices et valeurs naturels recherchés par un ou plusieurs bénéficiaires (Van Oudenhoven *et al.*, 2012 ; Roche *et al.*, 2016) (figure 2). Ainsi formalisés, les rapports entre les systèmes naturels et humains se caractérisent par des relations linéaires «*fourniture – demande*» en SE (Brunet, 2016). La fourniture en service se définissant comme «*la capacité des fonctions écosystémiques et éléments biophysiques d'un écosystème à fournir*

un ou des services écosystémiques» et la demande en service comme «*l'ensemble des biens et services consommés ou utilisés dans un lieu et un temps donné*» (Burkhard *et al.*, 2012). L'objectif du modèle de la cascade est d'analyser les liens entre les composantes écologiques et sociétales qui caractérisent les SE, dont la compréhension constitue l'une des conditions impératives du succès de nombreuses actions de gestion environnementale (Carpenter *et al.*, 2007 ; Liu *et al.*, 2007).

Certains auteurs ont fait différentes propositions pour enrichir le modèle de base et décrire chaque composante de la cascade pour une application aux écosystèmes planétaires. De Groot *et al.* (2002) proposent une typologie des fonctions écosystémiques en quatre catégories, dont les définitions ont été adaptées aux grands lacs dans le tableau 1. On y retrouve : (1) les fonctions de régulation, qui assurent un rôle important dans le stockage et la dégradation des apports de polluants, (2) les fonctions de production, qui déterminent la productivité de l'écosystème lacustre et participent à la formation de bio-ressources (poissons, végétaux), (3) les fonctions d'habitat qui permettent le maintien des cycles de vie, habitats et le patrimoine génétique des espèces (habitats fonctionnels, structure et fonctionnement du réseau trophique) et (4) les fonctions d'information, qui offrent aux grands lacs une eau avenante et des paysages agréables qui participent au cadre de vie et leur attractivité. Ce dernier type de fonctions est à relier aux caractéristiques bio-physiques lacustres qui ont une influence sur les représentations des lacs, les paysages et valeurs socio-culturelles associées à ces objets.

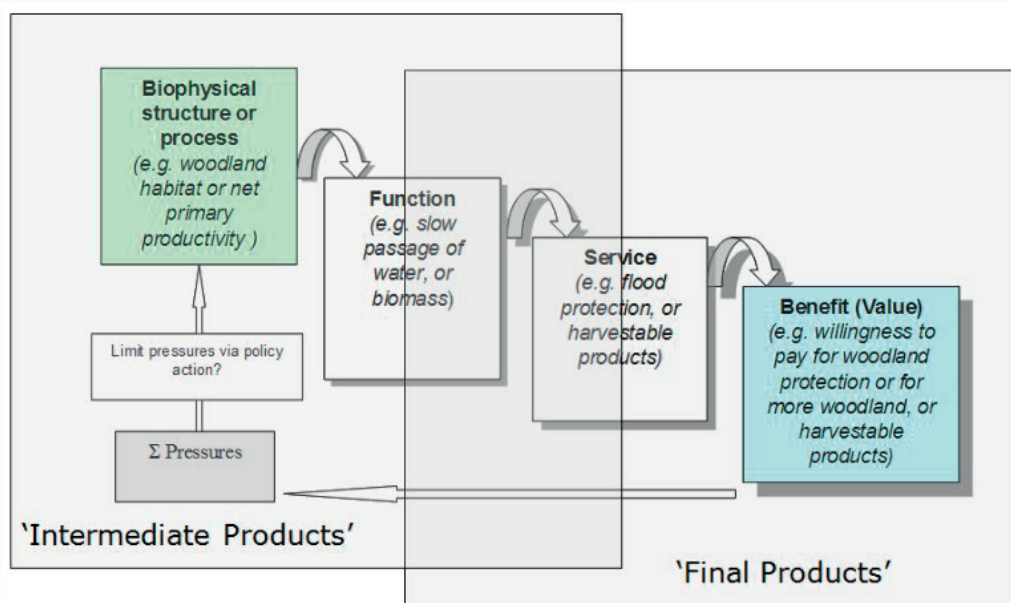


Figure 2 – Le modèle de la cascade représente les relations entre les processus biophysiques - fonctions écosystémiques et bénéfices rendus par les services écosystémiques (Potschin et Haines-Young, 2011)

TYPE	FONCTION	DÉFINITION	INDICATEURS POSSIBLES
Régulation	Contrôle biologique des perturbations	Interactions entre espèces à même d'influer sur le niveau d'abondance d'une espèce parasite, envahissante ou malade et de contrôler la charge polluante dans les eaux et les sédiments.	Concentration en polluants, organismes pathogènes, espèces invasives dans les eaux, les sédiments et les organismes.
	Contrôle physico-chimique des perturbations	Sédimentation, dilution et détérioration des matières organiques, nutriments et composants xéniques par les processus physiques et chimiques de l'écosystème. Ces mécanismes permettent de diminuer physiquement et chimiquement les concentrations en polluants.	
Production	Production et recyclage des nutriments (production et charge interne en P)	Transformation, détérioration et transport de la matière (nutriments, oxygène, carbone) à travers des processus biogéochimiques au sein des compartiments biotiques et abiotiques des écosystèmes (à partir de Fletcher <i>et al.</i> 2011 ; Schoenn <i>et al.</i> 2013).	Production primaire ; chlorophylle a ; abondance et diversité du phytoplancton et du zooplancton ; transparence ; concentrations en nutriments ; indice trophique ; carbone organique particulaire ; O2 dissous.
	Production primaire	Quantité de matière organique synthétisée par les organismes végétaux. Elle représente la masse de matières organiques (ou son équivalent énergétique) néoformées à partir de précurseurs minéraux simples par l'ensemble des organismes autotrophes pendant un intervalle de temps donné (Pourriot et Meybeck 1995).	
	Production secondaire	Quantité de matière organique animale produite par les consommateurs d'un écosystème (organismes hétérotrophes qui se nourrissent des producteurs primaires ou d'autres consommateurs par prédation). Elle résulte de l'accroissement en nombre et en poids des individus par unité de temps et d'espace.	
Habitat	Relations trophiques et interactions biotiques	Interactions entre les espèces reliées par les réseaux alimentaires et transmission de l'énergie dans les réseaux trophiques : contrôle top-down (cascade trophique), contrôle bottom-up. La notion de flux d'énergie est indissociable de celle de relation trophique.	Surface des herbiers à macrophytes, des frayères à poissons, roselières ; diversité et abondance des taxons dominants et groupes fonctionnels, rotifères et microcrustacés ; réseau trophique.
	Diversité spécifique et génétique	Diversité du nombre d'espèces occupant un habitat et diversité génétique infraspécifique au sein d'une espèce.	
	Structure et état physico-chimique des habitats	Formation des propriétés physico-chimiques des habitats nécessaires à la survie des espèces et au bon fonctionnement de l'écosystème.	
Information	Contribution à une eau avenante et des paysages agréables	Propriétés attractives de l'eau (visuelles, olfactives, gustatives, température) et variété des paysages lacustres (résultat tangible de l'interaction entre une société qui vit et tire profit des lacs et le support biophysique qui lui sert d'assise territoriale - d'après Vernex, 1985) visibles sur l'eau, sous l'eau, depuis les rives et en hauteur offrant un intérêt contemplatif pour les usages récréatifs, les pratiques sociales, culturelles et artistiques.	Abondance et diversité des espèces patrimoniales et habitats remarquables ; diversité des habitats littoraux ; couleur et transparence de l'eau ; présence de nuisances visuelles, olfactives, gustatives ; potentiel de recherche paléolimnologique.
	Qualité environnementale perceptible des milieux écologiques	Présence d'un écosystème d'intérêt pour la recherche, l'observation, l'enseignement, la sensibilisation à l'environnement pour les populations locales et touristes et milieu sentinelle des changements locaux, régionaux et/ou globaux.	

Tableau 1 – Définitions des fonctions écosystémiques des grands lacs et indicateurs possibles permettant d'en suivre l'état. Cette liste d'indicateurs se réfère à ceux utilisés dans le cadre des suivis des grands lacs alpins (CIPEL, 2018 ; SILA, 2018 ; CISALB, 2011).

Différentes classifications des services ont également été produites afin de rendre plus concret et plus opérationnel le concept de SE. Une classification globale et commune des SE a été proposée à travers le projet «The Common International Classification of Ecosystem Services» (CICES) afin de permettre une exploitation et une comparaison plus faciles des données scientifiques. Cette classification est renouvelée régulièrement car le concept fait encore débat dans la sphère scientifique, et la dernière en date a été proposée en janvier 2018. Ce système opte pour une classification des SE en trois catégories : (1) les services d'approvisionnement (produits agricoles, bois, eau potable, poissons, etc.), (2) les services culturels (aspects esthétiques, religieux, récréatifs...) et (3) les services de régulation (climat, inondations, purification de l'eau, etc.) servant de base au fonctionnement des deux premières catégories (cycle du carbone, formation des sols...).

Une composante importante du modèle de la cascade représente les «*bénéfices*» que rendent les SE aux humains. Ils peuvent être définis comme l'ensemble des changements positifs dans le bien-être à partir de l'accomplissement de besoins et de désirs formulés par des bénéficiaires (TEEB, 2010). Caractériser les bénéfices recherchés par les sociétés humaines permet de mieux comprendre les enjeux socio-économiques et de conservation associés à la gestion et la préservation des SE. Le MEA (Millennium Ecosystem Assessment) a proposé une typologie de quatre composantes du bien-être auxquels les bénéfices retirés des écosystèmes sont associés : la sécurité, les éléments essentiels pour une vie agréable, la santé et les bonnes relations sociales. Le MEA ajoute une dernière composante qui est la «*liberté de choisir et d'agir*» et fait référence à la capacité des individus à contrôler ce qui leur arrive et à pouvoir réaliser ce qu'ils souhaitent faire ou être (MEA, 2005).

Cependant, le modèle de la cascade ne prend pas en compte la dimension spatiale des SE et doit être adapté et complété pour prendre en compte les spécificités fonctionnelles des grands lacs. En plus du contexte climatique, socio-économique et juridique, et des possibles perturbations générées par les pratiques mobilisées pour exploiter les SE, l'adaptation de la cascade des SE aux grands lacs doit rendre compte de deux traits fonctionnels et à dimension géographique majeure de ces objets. En premier lieu, la forte dépendance vis-à-vis des hydrosystèmes amont dans le BV et aval (posée en termes de flux et de risques résultant de la qualité et de la quantité d'eau), ainsi que la non-coïncidence entre les aires de fourniture et de demande en SE.

Comme pour d'autres écosystèmes aquatiques (Busch et al., 2011), les aires de fourniture en SE sont distinctes spatialement des aires où sont localisés les bénéficiaires, du fait que les plans d'eau représentent un

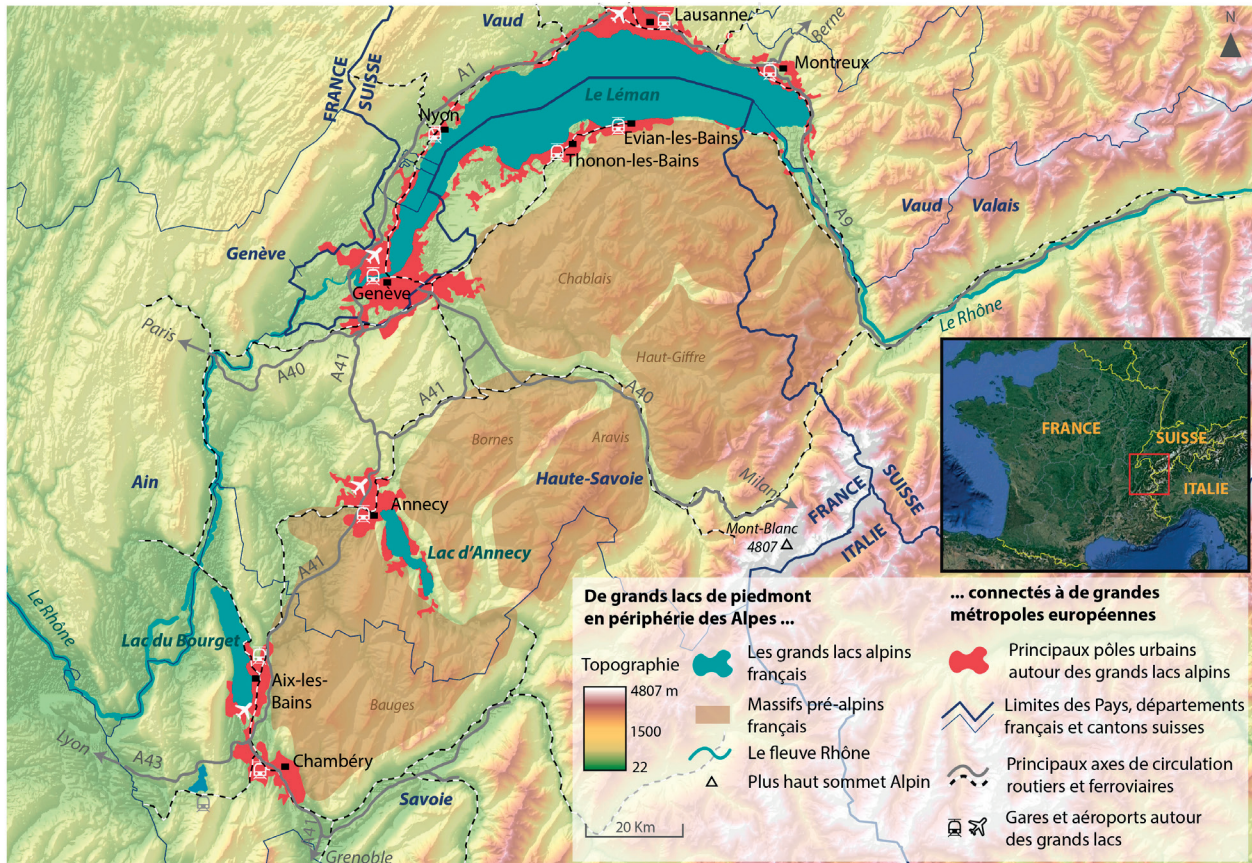
obstacle physique aux déplacements et à l'implantation d'infrastructures anthropiques. Les bénéficiaires des SE des grands lacs mobilisent alors presque toujours des pratiques, techniques et/ou mettent en œuvre des aménagements spécifiques pour «*accéder aux SE*» (ex. : l'utilisation d'appareils photos pour l'observation de la nature, de filets, hameçons, embarcations pour les pêches, de stations de pompes pour extraire l'eau potable...). «*L'accessibilité aux SE*» est une notion rarement mobilisée dans les études sur les SE (Ala-Hulkko et al., 2016), et généralement utilisée dans des approches de cartographie (Burkhard et Maes, 2017). Nous souhaitons la compléter avec une approche socio-culturelle et d'ingénierie mettant en avant l'importance des pratiques, techniques et aménagements mis en œuvre pour «*accéder aux SE*» et s'intéressant à la possibilité pratique et aux moyens techniques disponibles aux bénéficiaires pour en tirer avantage. Ainsi formalisée, l'accessibilité aux SE constitue le lien matériel entre la fourniture et la demande, elle peut être définie comme «*l'ensemble des possibilités effectives pour les bénéficiaires de quitter la zone où ils se trouvent pour se rendre jusqu'aux SE et pour en tirer profit*» (Ala-Hulkko et al., 2016).

L'accessibilité aux SE constitue donc un apport que nous souhaitons intégrer au modèle de la cascade pour étudier les SE rendus par les grands lacs alpins.

2 – Site d'études

Notre site de référence est constitué par trois territoires associés aux lacs du Bourget, d'Annecy et du Léman, chacun comprenant un grand lac, son BV et sa société. Ces trois systèmes sont soumis à des forçages climatiques, hydrologiques, socio-économiques, culturels et réglementaires peu ou prou similaires (figure 3). Ils sont situés en périphérie des Alpes et appartiennent au système fluvial du Rhône ; ils sont associés à des espaces de concentration urbaine et touristique, avec des usages et des acteurs communs. Ces territoires sont insérés dans de larges pôles de peuplement et d'activités économiques à l'échelle régionale, voire européenne (Genève, proximité avec le triangle industriel de l'Italie - Milan, Gênes, Turin). Enfin, ils sont porteurs d'une même dynamique de développement industriel et économique et associés à de forts enjeux de conservation de la biodiversité. Du fait de l'ensemble de ces caractéristiques territoriales et de leur surface supérieure à 10 km², les grands lacs alpins français et le Léman sont représentatifs de grands lacs à l'échelle des Alpes (Magni et Chinaglia, 2007).

Comme la plupart des grands lacs sur la planète, ils ont connu à partir des années 1950 un développement territorial intense, qui a conduit à l'émission croissante de flux de pollutions (ponctuelles essentiellement pour le cas spécifique des grands lacs alpins), qui ont



Sources : SRTM, 2000 ; BD CARTO 2016 ; Corine Land Cover ; Open Street Map ; The Noun Project. Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 3 – Carte de localisation des terrains d'étude : les grands lacs alpins français (le lac du Bourget et le lac d'Annecy) et le Léman

altéré l'état de ces lacs plus qu'à tout autre moment de leur histoire. Une telle évolution s'est traduite par des baisses de qualité des eaux et des milieux, associées à des pertes de ressources, des difficultés d'usages et des risques sanitaires (contaminations microbiennes, pollutions mercurielles, PCB). Les lacs Léman, d'Annecy et du Bourget ont des trajectoires d'impacts des pollutions similaires (Jacquet *et al.*, 2012 ; Jenny, 2013), marquées par une période d'intense eutrophisation dans la seconde moitié du XX^e siècle. Cette dégradation généralisée de la qualité de l'eau et des milieux lacustres est une pathologie mondiale qui a touché et touche encore la plupart des grands lacs dans le monde, avec des effets importants sur l'ensemble des SE. Les grands lacs alpins français représentent de rares exemples où la gestion a su faire face à ce problème et à ce titre, sont intéressants pour étudier les actions entreprises pour faire face aux atteintes sur les SE. Mais depuis le début des années 2000, certaines menaces inattendues sont révélées (impacts des micropolluants plastiques et médicamenteux sur la biologie lacustre et la santé humaine, réchauffement climatique, urbanisation du littoral, tourisme de masse) et nous pensons que l'étude du concept de SE apportera une clé de lecture pour interpréter le fonctionnement

des relations sociétés – grands lacs dans ce contexte et mieux étudier et gérer ces problématiques.

3 – Méthodologie

La modélisation porte ici sur l'étude des territoires limniques pour analyser les interactions entre les grands lacs et la société. Cette approche implique d'appréhender l'objet de manière systémique et intégrée, c'est-à-dire considérant l'ensemble des composantes biophysiques et sociétales incluses dans le territoire et d'analyser leurs imbrications. Pour y parvenir, nous avons choisi de mobiliser le concept de SE, dont l'intérêt premier pour notre étude est de permettre la construction d'un cadre théorique pour structurer notre démarche. Ceci étant, ce concept est depuis toujours soumis à de larges incertitudes.

Ces incertitudes proviennent en grande partie du manque de méthodologie universelle d'application de ce concept (Barnaud *et al.*, 2011) et du fait que cela implique dans la plupart des cas des adaptations conceptuelles et méthodologiques à l'objet et au sujet d'étude. Cela entraîne alors l'existence de multiples approches pour caractériser les SE, d'une grande variété de définitions, de modèles conceptuels ou encore de

typologies des SE (La Notte *et al.*, 2017). La première étape de recherche passe alors par la réalisation d'un ensemble de choix méthodologiques pour appliquer ce concept à partir de la littérature abondante sur ce sujet. Cette étape est nécessaire pour appréhender l'objet de manière intégrée et cadrer la recherche pluridisciplinaire. Pour cela, nous avons adopté une méthode fondée sur la collecte de données à dire d'experts au travers d'ateliers participatifs. Trois ateliers ont réuni quatorze experts de différentes disciplines, à la fois des limnologues et écologues impliqués dans les suivis des grands lacs alpins et des experts de sciences humaines et sociales spécialisés dans l'étude des territoires alpins ou associés aux lacs (tableau 2 –

A). Ces ateliers visaient à identifier les composantes de la fourniture (fonctions écosystémiques) et de la demande en SE (pratiques et bénéficiaires) et leurs interactions pour définir les enjeux de gestion auxquels sont soumis les grands lacs alpins. Dans cette perspective, l'importance des services de régulation des qualités de l'eau et des milieux lacustres pour la fourniture des SE a été mise en avant. Trois services d'approvisionnement et culturels ont également été identifiés comme prioritaires à prendre en compte dans l'évaluation, du fait de leur importance pour le territoire limnique et leur vulnérabilité. Il s'agissait des SE «*d'approvisionnement en eau potable*» et «*d'approvisionnement en bio-ressources à des fins*

A - Phase de cadrage conceptuel		
Discipline de l'expert et domaine de compétence	Nombre	Nom de l'atelier*
Écologue, limnologue, suivi écologique du Léman	2	1 et 2
Écologue, halieutique, suivi piscicole des trois grands lacs alpins	1	2
Écologue, halieutique, suivi écologique du lac d'Annecy	1	1 et 2
Écologue, limnologue, suivi écologique du lac du Bourget	2	1 et 2
Agronome, limnologue, relations BV - lac	2	1, 2 et 3
Géographe, droit des lacs alpins	1	3
Géographe, tourisme de montagne (Alpes)	2	3
Géographe, tourisme lacustre, archéologie	2	3
Économiste, innovation territoriale (Alpes)	1	2 et 3
B - Phase de test et validation du modèle conceptuel		
Type d'expert technique impliqué dans la gestion des grands lacs alpins et domaine de compétence	Nombre	Nom de l'atelier*
Gouvernance Léman	2	4
Gouvernance lac d'Annecy	1	4
Gouvernance lac du Bourget	1	4
Gouvernance lac d'Aiguebelette	2	4
Agence de l'Eau Rhône-Corse-Méditerranée	1	4
Direction Départementale des Territoires de haute savoie	1	Entretien individuel mai 2018
Maires et élus de communes littorales des lacs d'Annecy et du Bourget	3	Entretien individuel juillet 2018
C - Colloques et séminaires scientifiques de présentation des résultats		
Nom de l'événement	Date	Lieu
Assemblée Générale des réserves naturelles de Haute-Savoie	May-17	Annecy
Summer School Goses 2	Jul-17	Brest
Assemblée générale de l'UMR Edytem	Fev 2018	Le Bourget-du-Lac
Séminaire interne de l'UMR CARTEL	Apr-19	Thonon-les-Bains
Séminaire du métaprogramme INRA-ECOSERV	Sep-19	Thonon-les-Bains

Tableau 2 – Méthodologie d'enquête participative ayant servi à développer le cadrage conceptuel, le tester et le valider avec les acteurs du territoire.

*Noms des ateliers : 1/ Définition des services écosystémiques des grands lacs alpins et modèle conceptuel (6 février 2017) ; 2/ Recherche des déterminants biophysiques des services écosystémiques des grands lacs alpins (24 février 2017) ; 3/ Recherche d'une typologie des pratiques associées aux services écosystémiques des grands lacs alpins (17 mai 2017) ; 4/ Organisation de la gouvernance des grands lacs alpins et apports du concept de service écosystémique à la gestion (28 juin 2017).

alimentaires», dont les problématiques de micro-pollutions questionnent et inquiètent les gestionnaires des grands lacs alpins et le SE culturel «*interactions physiques et récréatives avec les grands lacs*» qui engendre une sur-fréquentation estivale menaçant certains habitats littoraux, limitant l'accès à d'autres services et dont l'évolution future est difficile à

prévoir. Ces SE identifiés avec leurs composantes ont ensuite été présentés aux structures coordinatrices de la gestion des grands lacs alpins qui les ont confirmés (tableau 2 – B). Enfin, plusieurs séminaires scientifiques, ont permis de tester la typologie des SE élaborée par un public disciplinaire plus large (tableau 2 – C).

II – RÉSULTATS

1 – Définitions et processus clés associés aux SE des grands lacs alpins

L'inventaire des SE, leur classification et leur définition sont des étapes de cadrage incontournables à toute étude sur les SE. Cette étape peut s'avérer chronophage tant la littérature est abondante sur le sujet (La Notte *et al.*, 2017). Nous proposons ici une synthèse de cette phase de travail appliquée aux grands lacs alpins, réalisée en s'inspirant des références parmi les plus communément utilisées pour étudier les SE afin de garantir le plus de flexibilité possible dans l'application de ces informations à d'autres études. Ce cadrage conceptuel a été mené en collaboration avec des chercheurs de différentes disciplines qui étudient

les grands lacs alpins et gestionnaires, comme le préconisent plusieurs études (De Groot, 2005 ; Nahlik *et al.*, 2012 ; Van Oudenhoven *et al.*, 2012).

On considère que plus le nombre de SE à fournir par un écosystème est élevé, plus le temps de production, l'espace de fourniture de ces services et la biodiversité doivent être importants (IPBES, 2018a). Du fait d'un grand volume des cuvettes lacustres, d'un temps de résidence des eaux s'étalant de 6 à 12 ans, d'une biodiversité et d'habitats remarquables et reconnus (présence de Zone Ramsar, Natura 2000, réserves naturelles, APPB), ces conditions placent les grands lacs alpins en tant que «*fournisseurs de SE à des niveaux élevés*», que nous listons et définissons dans le tableau 3.

Type de SE	Nom du Service (libellé)	Définition du service	Exemple de processus biophysiques ou socio-économiques	Exemples de bénéficiaires directs
Approvisionnement	Eau potable («SE eau potable»)	Utilisation de l'eau potable issue des grands lacs pour l'alimentation	Faire profiter d'une eau de qualité, facilement accessible et à moindre coût	Riverains des lacs et touristes
	Eau utilisée à des fins matérielles	Utilisation de la force hydraulique, des propriétés thermiques de l'eau ou de l'eau comme support des usages	Utilisation de l'eau et du débit pour produire de l'énergie hydraulique, mécanique, d'inertie ou comme support de la navigation	Acteurs économiques de la navigation commerciale et de plaisance ; producteurs d'hydroélectricité ; industriels
	Bio-ressources à des fins alimentaires («SE pêche»)	Animaux et végétaux prélevés en milieu naturel destinés à la consommation	Prélèvements d'animaux pour la pêche professionnelle et récréative, pour la chasse au gibier d'eau	Pêcheurs professionnels, de loisir ; chasseurs
	Bio-ressources à des fins matérielles	Animaux ou végétaux prélevés en milieu naturel destiné à un usage direct à des fins non alimentaires	Déchets sur les plages et bio-ressources utilisés pour la fabrication d'objets d'artisanat, de composés pharmaceutiques, utilisation du bois flotté pour la fête des flotins à Evian	Artisans, industrie pharmaceutique, riverains, communes, artistes
	Ressources minérales ou propriétés de l'écosystème à des fins matérielles	Substances minérales ou propriétés de l'écosystème exploitées pour des usages matériels ou énergétiques	Utilisation des eaux froides pour refroidir bâtiments et industries en été à Genève	Collectivités territoriales, industries

Type de SE	Nom du Service (libellé)	Définition du service	Exemple de processus biophysiques ou socio-économiques	Exemples de bénéficiaires directs
Régulation	Régulation des flux liquides et des événements extrêmes	Procurer un stock d'eau optimal pour les usages des grands lacs alpins et prévenir / réduire l'érosion des sols riverains et les risques d'inondation et d'étiage liés aux phénomènes météorologiques extrêmes	Régularisation du niveau des lacs, du débit du Rhône	Riverains, collectivités territoriales au bord des lacs
	Filtration et purification de l'eau et des sédiments («SE filtration»)	Filtration, séquestration, stockage, épuration et traitement des déchets et substances toxiques d'origine anthropique	Autoépuration de l'eau et du substrat par les daphnies, les rosélières, plantes aquatiques, les décomposeurs et la méiofaune ; sédimentation et dilution des polluants dans l'eau, sédimentation	Collectivités territoriales, STEP, secteur de la santé, assureurs
	Lutte contre les parasites, espèces envahissantes et les maladies («SE lutte contre les parasites»)	Ensemble des processus écologiques, interactions entre espèces à même de réguler le niveau d'abondance et la diversité des espèces parasites, envahissantes et/ou malades et maladies	Contrôle des maladies au sein des populations animales à travers les relations trophiques ; contrôle du développement de bactéries fécales et cyanobactéries	Collectivités territoriales, secteur de la santé, assureurs, usagers en contact avec l'eau
	Maintien des cycles de vie, habitats et patrimoine génétique («SE habitats»)	Présence de zones de nurserie, zones frayères, zones de nourrissage, zones refuge, zones de repos, couloirs de migration pour l'ensemble de la faune et la flore des lacs. Ensemble des processus assurant le maintien d'une diversité spécifique et génétique	Assurer la présence de zones de frai, d'habitat et de nourrissage pour la biodiversité ; assurer le bon fonctionnement des réseaux trophiques	Usagers des bio-ressources du lac et des activités récréatives d'observation des milieux naturels
	atténuation, suppression des nuisances sonores, olfactives et visuelles d'origine anthropique	Eléments des écosystèmes lacustres qui atténuent ou suppriment les nuisances sonores, olfactives et visuelles d'origine anthropique	Limitation des nuisances sonores, olfactives ou visuelles d'origines anthropiques par la présence de parois rocheuses et formations végétales	Riverains, touristes, collectivités territoriales, industriels, usagers pouvant générer des nuisances pour les autres usagers
	Régulation du climat local - global et de la qualité de l'air	Régulation de la température et de l'humidité de l'air à proximité des lacs. Atténuation des impacts du réchauffement climatique	Régulation thermique sur les abords des lacs, stockage du carbone dans les sédiments	Ce service profite à tous les habitants vivant à proximité du lac et bénéficiaires des SE amenés à venir sur le lac ou son littoral.
Type de SE	Nom du Service (libellé)	Définition du service	Exemple de processus biophysiques ou socio-économiques	Exemples de bénéficiaires directs
Culturels	Interactions physiques et récréatives avec l'environnement naturel («SE loisirs»)	Eléments et caractéristiques des écosystèmes permettant la pratique d'activités favorisant la santé, le repos ou le plaisir par des interactions actives, immersives, passives ou d'observation.	Les grands lacs constituent une destination touristique majeure car ils permettent une grande polyvalence d'activités sur un même site	Riverains, touristes, collectivités territoriales et acteurs du tourisme
	Interactions spirituelles, symboliques et autres avec l'environnement naturel («SE image»)	Eléments des écosystèmes qui ont une signification symbolique, sacrée, religieuse, qui résonnent en termes de culture, d'histoire ou d'héritage et d'image du territoire	Les grands lacs alpins sont associés à des images de milieux naturels préservés, des lieux de repos, de détente, d'inspiration pour l'art, la littérature, des lieux de rencontre et de lien social	Riverains, touristes, collectivités territoriales, acteurs du tourisme
	Interactions scientifiques et éducatives avec l'environnement naturel	Caractéristiques des écosystèmes comme supports de la recherche scientifique, de l'éducation et de la connaissance	Les lacs sont des sentinelles des changements régionaux, et présentent des archives sédimentaires	Acteurs scientifiques, de la sensibilisation à l'environnement et l'éducation

Tableau 3— Liste et définitions des SE des grands lacs alpins.

2 – La variété des SE d’approvisionnement et culturels

Les grands lacs alpins produisent des services d’approvisionnement en biens indispensables aux activités humaines du territoire. Ces SE profitent à un très grand nombre de bénéficiaires : plus de 1 200 000 habitants consomment l’eau des grands lacs alpins (CISALB, 2011 ; CIPEL, 2018 ; Frossard *et al.*, 2018), l’activité de pêche professionnelle fait vivre 152 pêcheurs professionnels et la pêche de loisir attire plus de 10 700 pêcheurs chaque année (Montuelle et Clémens, 2015). Le Léman offre des énergies renouvelables aux industriels : hydroélectricité (barrage du Seujet à Genève), régulation thermique de certains quartiers industriels et résidentiels de Genève ou Lausanne, ou encore de l’accélérateur à particule du CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), avec un volume de plus de 3,3 millions de m³ d’eau prélevé par an (puis réinjecté au lac) pour ce seul besoin depuis 1976 (secrétaire générale de la CIPEL, communication personnelle).

Le tourisme, véritable moteur de développement économique des territoires limniques, génère un chiffre d’affaires annuel évalué à plus de 33 millions d’euros (HT) pour la pratique des activités nautiques seules (navigation et loisirs nautiques) et représente un parc d’hébergements touristiques totalisant plus de 4,3 millions de nuitées dans les campings et hôtels autour des trois grands lacs alpins, employant plus de 2 500 personnes (Baguet et Klein, 2015). L’attractivité de ces grands lacs est offerte par la qualité des services culturels rendus qui fournissent des paysages avenants, une eau aux propriétés visuelles singulières, une diversité de lieux favorisant la pratique d’activités sportives, ludiques et récréatives, d’éducation et de sensibilisation à l’environnement (sur ces volets touristiques, voir également les articles de Jobert et Duval, et de Duval *et al.*, 2021, dans ce même numéro). Ces caractéristiques représentent autant d’opportunités pour la détente, la spiritualité, les liens sociaux, le dépaysement, l’inspiration et la créativité, l’art, la culture, la recherche scientifique, ou encore le ressourcement, le bien-être et la santé. Ces bénéfices ne profitent pas aux seuls touristes et visiteurs passagers, mais participent au cadre de vie général, à la transmission de valeurs, d’une identité et d’un sentiment d’appartenance au territoire limnique pour un grand nombre de bénéficiaires, usagers ou riverains. À ce titre, l’influence d’un lac sur les activités récréatives dépasse les limites du plan d’eau et il n’est pas possible de limiter les pratiques récréatives associées à un lac uniquement à celles qui sont en contact avec l’élément liquide. L’accès aux SE culturels est favorisé par la présence de reliefs autour des plans d’eau, qui permettent de disposer d’une large aire de vue sur les lacs : le mont Revard, le col du Sapenay et

le col du Chat sont par exemple des aires de départ de vol libre très prisées des parapentistes et randonneurs car ils fournissent une vue privilégiée sur le lac du Bourget. Cette diversité des pratiques associée aux SE culturels constitue une des principales difficultés à l’évaluation de ce type de SE.

3 – Le rôle déterminant des SE de régulation de la qualité de l’eau

La qualité des SE d’approvisionnement et des SE culturels est déterminée par l’état des services de régulation des qualités de l’eau et des milieux, dont certains processus sont spécifiques aux plans d’eau de grande taille comme la dilution et la décantation (ce qui contribue à atténuer les pollutions), les effets tampons par rapport au climat et événements extrêmes climatiques, les interactions avec une diversité d’habitats ou encore, pour les riverains, un environnement de vie exempt de maladies et d’affections présentes sur d’autres régions du globe (Pourriot et Meybeck, 1995). Aussi, seul un grand lac peut fournir des SE de régulation de la qualité des eaux suffisants pour assurer un bénéfice de régulation des eaux usées traitées et d’une partie des pollutions diffuses (Jenny *et al.*, 2020). Ces effets ne sont néanmoins pas toujours suffisants. Dans les grands lacs alpins, les atteintes générées par les pollutions au cours du XX^e siècle ont des conséquences sur le long terme sur les services de régulation avec des répercussions importantes sur d’autres services. Le développement de cyanobactéries toxiques héritées de l’eutrophisation du lac du Bourget est un exemple qui a nécessité la fermeture de plusieurs plages en période estivale à différentes reprises depuis le milieu des années 1990, portant atteinte aux services culturels (Jacquet *et al.*, 2005).

Malgré leur importance, les SE de régulation des qualités de l’eau et des milieux sont relativement peu étudiés, bien que leur place soit primordiale dans la fourniture de la plupart des SE des grands lacs et pour le bien-être humain. Notre liste des SE de régulation des qualités de l’eau et des milieux associe trois services de régulation (les «SE filtration», «SE lutte contre les parasites» et «SE habitats») qui fonctionnent en synergie. Cette typologie est identique à celle mobilisée dans l’article de Keeler *et al.* (2012), considéré comme une référence sur l’étude des relations entre «qualités de l’eau et SE».

Les services de régulation pilotent par ailleurs directement ou indirectement l’ensemble des SE des grands lacs alpins mais, face à une perturbation, ces services peuvent engendrer des disservices, à savoir des processus susceptibles de nuire au bien-être (IPBES, 2018b). Par exemple, sous certaines conditions anaérobies favorisées par des pollutions (eutrophisation) ou par le réchauffement climatique, les processus physico-chimiques de stockage de

certaines polluants dans les sédiments peuvent devenir inefficaces voire s'inverser. Les polluants, libérés dans la colonne d'eau, peuvent entraîner des épisodes de pollution intense, ou accentuer ceux en cours. Ce processus a largement limité la vitesse de restauration des trois grands lacs alpins face à l'eutrophisation (Jenny, 2013). L'autre disservice occasionné par la pollution est lié au processus de bioaccumulation. Ce processus naturel permet aux Oméga 3, nutriments et acides gras essentiels à une alimentation saine et de qualité d'être emmagasinés dans les poissons exploités par la pêche, mais en présence de certains polluants persistants (ex. : PCB, métaux lourds), favorise une accumulation des composés toxiques dans la chair des poissons et engendre des risques sanitaires par ingestion des organismes contaminés.

Hors de ce contexte de perturbations, les grands lacs alpins possèdent quelques disservices en relation avec le SE de lutte contre les parasites et les maladies, qui vont se traduire par des problématiques de santé (infections microbiennes rhino-bronchiques, pathologies infectieuses et parasitaires, affections dermatologiques, nuisances liées à la puce du canard – Dr Prigent, communication personnelle). À noter que la dilution de la dose infectante limite fortement le risque de contaminations bactériennes ou virales. Les risques sanitaires sont donc moins importants sur un grand lac qu'un petit lac.

4 – Adaptation du modèle de la cascade aux grands lacs alpins

À partir de la liste des SE présentée, il est possible d'engager une réflexion pour proposer une adaptation du modèle de la cascade aux grands lacs alpins. Un modèle conceptuel des SE est un outil à la fois méthodologique, permettant de structurer la recherche, et un modèle d'analyse des interactions

sociétés – écosystèmes, prenant souvent la forme d'un organigramme. Le modèle de la cascade des SE peut fournir un cadre pour étudier l'imbrication des grands lacs et des activités humaines, mais sous sa forme actuelle, il ne permet pas la prise en compte du BV comme une composante à part entière du système lacustre, capable d'influencer la fourniture des SE. Le modèle de la cascade ne considère pas non plus la relation entre les écosystèmes et le bien-être humain comme intégrée au sein d'un « socio-écosystème », à savoir un système cohérent de facteurs sociaux et biophysiques qui interagissent de façon durable (Ostrom, 2009). La notion de socio-écosystème permet d'envisager l'influence de certains forçages du système lacustre sur la fourniture et la demande en SE (ex. : forçages climat, modes de vie, réglementaires).

En conséquence, le modèle de la cascade a besoin d'être adapté et complété pour prendre en compte les spécificités fonctionnelles et géographiques des terrains d'étude et intégrer les enjeux de gestion et de développement auxquels ils sont soumis. Trois modifications majeures du modèle de la cascade sont à développer : (1) représenter explicitement les relations entre les SE d'approvisionnement, les SE culturels et les SE de régulation, jugés par les experts rencontrés comme participant à la fourniture de la plupart des SE des grands lacs, (2) prendre en compte les pratiques et techniques mobilisées pour accéder aux SE, et considérer les possibles pressions qui en résultent, (3) faire apparaître les forçages hydrochimiques issus du BV et le contexte socio-économique et juridique permettant d'en contrôler les impacts.

Ainsi modifié, le modèle de la cascade considère deux compartiments principaux (figure 4) : le premier, correspondant aux habitats et à la biodiversité, au sein duquel les fonctions écosystémiques fournissent des SE ; le second représente le bien-être humain constitué par l'ensemble des bénéficiaires émettant une demande

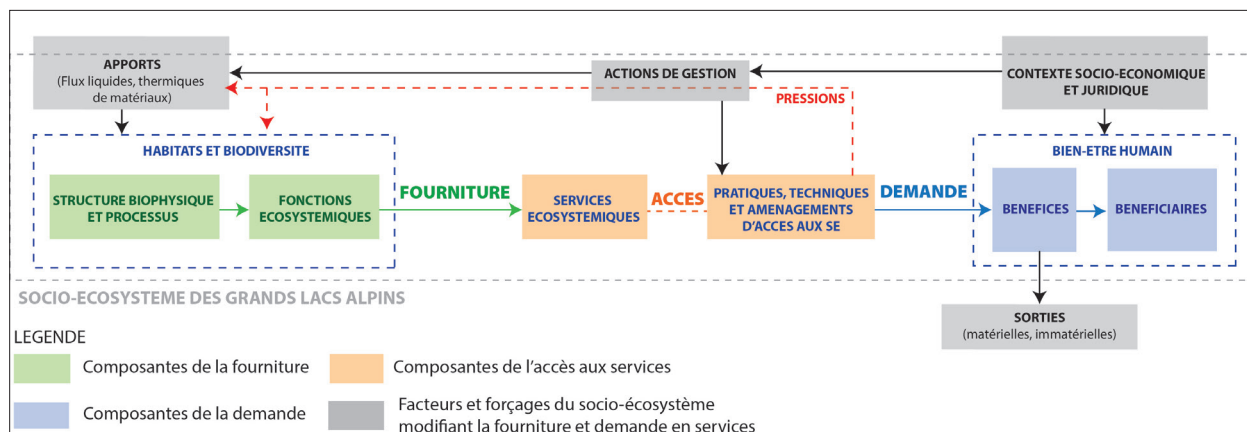


Figure 4 – Adaptation du modèle de la cascade pour l'étude des services écosystémiques des grands lacs alpins (d'après Potschin et Haines-Young, 2011 – voir figure 2).

en termes de bénéfices rendus par le lac. L'accès aux SE est matérialisé par une relation entre les SE et les pratiques, techniques et aménagements d'accès aux SE. Cet accès est dynamique dans le temps et l'espace car il répond aux variations saisonnières et spatiales de la fourniture et de la demande en SE, c'est pourquoi il est matérialisé en pointillé sur le schéma.

Certaines pratiques et aménagements d'accès aux SE, notamment ceux qui exploitent les biens matériels (ex. : pêche, eau potable) peuvent générer en retour des pressions positives ou négatives sur les habitats et la biodiversité (voir flèche «pression» sur la figure 4). Celles-ci sont susceptibles de modifier les fonctions écosystémiques et potentiellement avoir des répercussions sur l'ensemble des SE par un effet de rétroaction (Carpenter *et al.*, 2007). Par exemple, certaines pratiques non maîtrisées, comme la surpêche dans le Léman dans les années 1970, impulsée par une absence de réglementation spécifique restreignant la capture des perches (Gagnaire, 1988) ont entraîné une diminution des stocks de l'espèce (l'impact de l'eutrophisation et d'une mauvaise reproduction des perches accentue l'effet de la surpêche, jusqu'à provoquer une chute de plus de 4 fois des captures entre 1976 et 1981), et affecté la fourniture en «SE pêche». Indirectement, cette atteinte s'est répercutée sur la demande en «SE loisirs» du fait des pertes d'intérêt occasionnées pour la pêche récréative. La forte fréquentation du lac d'Annecy pour les loisirs et l'urbanisation des rives constitue un autre exemple des pressions résultant de pratiques non maîtrisées, et contribuant à diminuer l'attrait global du plan d'eau (Nikolli, 2018).

Afin de maintenir la fourniture des divers SE dans un état satisfaisant la demande des bénéficiaires et limiter les rétroactions négatives, des actions de gestion sont engagées pour limiter les pressions, notamment en ajustant l'accessibilité aux SE par les pratiques (ex. : interdiction d'accès à certaines zones, limitation d'utilisation de certains moyens de pêche, coût d'entrée aux plages, limitation de l'urbanisation sur le littoral). C'est l'objet de nombreuses actions de gestion, engagées en tenant compte des forçages socio-économiques et juridiques (ex. : réglementations nationales, européennes, marchés économiques).

La relation atmosphère – BV – lac constitue un autre forçage modifiant les SE, d'origine biophysique représentée dans les «apports» (les flux liquides et hydrochimiques portés par les affluents, flux d'énergie thermique issus de l'évolution du climat). Ces apports peuvent être une source de perturbation pour les habitats, la biodiversité ou la qualité de l'eau (ex. : flux de polluants - phosphore, micropolluants). La gestion des grands lacs alpins s'est organisée au cours du XX^e siècle autour de la régulation de ces apports *via* des actions dans le BV (Baulaz, 2020). Les forçages biophysiques, socio-économiques et juridiques sont

à la fois d'origine endogène et exogène au socio-écosystème, d'où une représentation dépassant le cadre du système.

Formulant ainsi les relations et rétroactions entre les écosystèmes et la société, l'adaptation de la cascade permet d'organiser les informations de multiples natures nécessaires à l'étude pluridisciplinaire des SE des grands lacs alpins. La section suivante propose une application de la cascade à l'étude de trois services des grands lacs alpins, afin de montrer en quoi ce modèle permet de bien organiser les données relatives aux SE.

5 – Caractériser trois SE importants pour la gestion des grands lacs par l'utilisation du modèle en cascade

À partir de l'adaptation du modèle de la cascade et des différentes notions présentées jusqu'ici, il est possible d'identifier les principales composantes des SE des grands lacs alpins et de structurer leur étude. Le tableau 4 synthétise, pour les trois services identifiés comme étant associés à de forts enjeux pour les grands lacs alpins par les experts rencontrés, un ensemble d'informations sur les composantes de la fourniture, de l'accès et de la demande de ces services.

Concernant la fourniture, les déterminants biophysiques de chaque SE diffèrent. Certains SE sont déterminés par l'état de certaines espèces d'intérêt patrimonial ou fonctionnel ou dépendent des processus et fonctionnements lacustres complexes. La fourniture du «SE pêche» ou de certaines pratiques associées au «SE loisirs» (ex. : pêche amateur, plongée sous-marine, observation de la nature) évolue en fonction de la présence et de l'abondance de certaines espèces spécifiques (ex. : présence d'espèces d'intérêt patrimonial, comme l'omble-chevalier), alors que la plupart des SE sont déterminés par l'intensité de certains processus et fonctions écosystémiques (ex. : la dissémination des nutriments dans l'eau, la compétition inter-spécifique, la photosynthèse...). L'état de la biodiversité et la structure du réseau trophique sont déterminants pour l'ensemble de ces processus car ils permettent aux espèces de soutenir différentes fonctions écosystémiques à la base des services. La fourniture en SE peut donc être mesurée par un suivi de l'état des différentes fonctions écosystémiques. La dernière colonne du tableau 1 liste un ensemble d'indicateurs écologiques de fonctions utilisés dans le cadre du suivi des grands lacs alpins. Par ailleurs, des relations d'interdépendances sont observables entre les différents types de fonctions si bien qu'une atteinte à un type de fonction peut se répercuter sur les autres et entraîner une réaction en chaîne conduisant à la dégradation des fonctions, puis des services de régulation liés et des SE d'approvisionnement et culturels. Bien identifier une atteinte sur un type de fonction permet d'anticiper l'aggravation d'un

phénomène et les possibles atteintes sur la fourniture en SE.

Ceci étant, le suivi des fonctions écosystémiques d'un lac ne suffit pas à renseigner l'état des SE, dont l'existence dépend également d'une demande sociétale. Nous devrions plutôt parler «des demandes en SE» car chaque service satisfait différentes composantes du bien-être humain et peut répondre à plusieurs demandes spécifiques. Cela se traduit dans le modèle de la cascade par un ensemble de relations SE – bénéfice – bénéficiaires, dont l'accès constitue le moyen pratique de les exprimer.

À titre d'exemple, le «SE pêche» satisfait différents types de bénéficiaires (tableau 4) : il procure des revenus aux pêcheurs professionnels, aux revendeurs (mareyeurs, restaurateurs), fabricants et vendeurs de matériel de pêche ; il est bénéfique pour la santé des consommateurs, touristes et offre l'opportunité aux pêcheurs de loisir d'entretenir de bonnes relations sociales et de profiter des valeurs récréatives associées aux grands lacs alpins. Pour chacun de ces bénéficiaires sont associées des pratiques d'accès différentes au SE. Il existe par exemple par un large choix d'engins et outils de pêche pour les pêcheurs professionnels (filets, nasses) et de loisir (fils, hameçons, nasses), dont les pressions varient sur les habitats et la biodiversité. Aussi, une évolution de la fourniture de ce service peut se répercuter sur l'ensemble de la filière pêche et avoir des conséquences sociales et économiques indirectes majeures pour le territoire limnique. L'état du territoire est alors intrinsèquement lié à l'état des SE et inversement.

Un écosystème qui apporte de nombreux avantages est associé à un grand nombre de pratiques et de bénéficiaires, ce qui peut engendrer des risques accrus de perturbations et de difficultés d'accès pour certains SE. Dans ces situations et afin de préserver l'écosystème et les SE, la gestion des grands lacs peut

agir de différentes façons dont la pêche fournit un bon exemple. Il est possible d'augmenter le potentiel de fourniture d'un SE (ex. : opérations d'alevinages dans les lacs), de modifier la demande en limitant le nombre de bénéficiaires (ex. : limiter le nombre de licences de pêche), ou en mettant en place une réglementation sur les pratiques socio-économiques et techniques d'accès aux SE (ex. : modifier le nombre d'engins de pêche, leurs caractéristiques techniques)¹.

L'accessibilité est une variable tout particulièrement importante à prendre en compte pour les SE culturels des grands lacs du fait qu'un déplacement des bénéficiaires est nécessaire pour pouvoir en profiter (Fisher et Turner, 2008). Cela implique la construction d'aménagements spécifiques d'accès aux SE autour des lacs. Ces aménagements ont ici trois fonctions : 1/ assurer une capacité d'accueil suffisante des bénéficiaires sur le territoire (hôtellerie, campings, nombre de places aux ports), 2/ faciliter l'accès physique et les déplacements jusqu'aux aires de fourniture (présence de réseaux routiers, ferroviaires, sentiers, de points d'information touristique), 3/ restreindre l'accès à certains espaces par l'application de normes (ex. : réserves naturelles, arrêté préfectoral de protection de biotope, interdiction d'accès).

Ces différentes applications du modèle de la cascade montrent que l'étude des relations entre fourniture ; accès et demande peuvent soutenir la gestion environnementale. Le cadre conceptuel représente alors un outil pour évaluer l'état des SE, identifier l'origine d'une atteinte à la fourniture ou la demande, envisager la transmission des impacts entre SE voire dans le territoire limnique. Il offre l'opportunité d'anticiper les perturbations sur les écosystèmes aquatiques et leurs conséquences sur les activités, suggérant ainsi la possibilité d'appliquer le modèle de la cascade pour soutenir et cadrer des perspectives sur l'évolution des territoires limniques.

III – DISCUSSION

1 – Avantages, limites de la cascade des SE et domaine d'application

La science des socio-écosystèmes est encore jeune (Holzer *et al.*, 2018). Il n'existe pas de cadres d'application du concept de SE pour tous les types d'écosystèmes et de problématiques et il n'existe pas non plus de modèles conceptuels généralisables à l'ensemble des cas traités en tant que socio-écosystèmes. Il s'agit d'une difficulté des plus importantes de ce concept (Boyd et Banzhaf, 2007), qui a nécessité le développement d'un cadre conceptuel spécifique pour l'étude des grands lacs (figure 4). Mais selon nous, il s'agit également d'une de ses principales forces, lui conférant une grande adaptabilité selon les contextes et types d'écosystèmes.

Dans cette étude, nous avons été confrontés à deux verrous majeurs du concept de SE : la difficulté de prise en compte des écosystèmes couplés tels que les lacs et leur BV, et l'intégration insuffisante des processus socio-économiques, culturels et de gouvernance dans la plupart des cadres conceptuels. Pour y faire face, le modèle de la cascade a donc été complété et adapté en tenant compte des spécificités fonctionnelles et géographiques des grands lacs et leurs relations avec leur BV et la société. La conceptualisation qui en résulte met en évidence les fonctions écologiques et sociales clés du système étudié, ce qui constitue une avancée théorique et pratique. Elle ouvre des perspectives de renouvellement des modèles actuels de gestion, intégrant de nouvelles dimensions relatives aux forçages exogènes, à la gouvernance et aux usages

SE	Équivalences	Composantes de la fourniture	Composantes de l'accès	Composantes de la demande
Approvisionnement en bio-ressources à des fins alimentaires	Food (MEA), Food and feed (IPBES)	Abondance, diversité des espèces cibles de la pêche : le corégone, l'omble-chevalier, la truite lacustre, le brochet, la perche commune, le gardon, l'ablette, la lotte, l'écrevisse américaine	<ul style="list-style-type: none"> • Engins de pêche utilisés pour la pêche professionnelle et de loisir • Nombre d'engins de pêche autorisés par sortie de pêche (nombre de filets, fils, hameçons, casiers) • Taille des mailles du filet • Quotas de pêche annuels • L'exploitation de ce SE est encadré par un règlement spécifique pour chacun des lacs 	<p>Bénéfices : capacité d'accès aux ressources procurant des revenus et conduisant au bien-être ; capacité d'accès à une alimentation adéquate ; opportunité d'extérioriser les valeurs récréatives et beauté écologiques liées aux écosystèmes ; opportunités d'extérioriser les valeurs culturelles et spirituelles liées aux écosystèmes ; opportunités d'observer, d'étudier et de découvrir les valeurs cachées des écosystèmes.</p> <p>Bénéficiaires : pêcheurs professionnels (11 au Bourget, 2 à Annecy, 150 au Léman) ; pêcheurs amateurs (8000 au Léman, 1200 à Annecy, 1500 au Bourget) ; poissonniers et grossistes ; restaurateurs ; services portuaires ; fabricants et vendeurs de matériels ; consommateurs et touristes</p>
Approvisionnement en eau potable	Fresh water (MEA, IPBES)	Temps de séjour et hydrologie lacustre, température, charge externe, matières en suspension.	<ul style="list-style-type: none"> • Techniques de filtration des stations de pompage, de stockage et de distribution • 2 stations de pompage au Bourget, 3 à Annecy, 10 dans le Léman • L'exploitation de ce SE est encadré par des directives européennes, lois nationales et des schémas directeurs 	<p>Bénéfices : capacité d'accès aux ressources procurant des revenus et conduisant au bien-être ; capacité d'accès à l'eau potable.</p> <p>Bénéficiaires : collectivités territoriales et gestionnaires des services d'eau potable aux collectivités ; assureurs. À titre d'exemple, 3 255 hab desservis au Bourget, 189 000 hab à Annecy, 900 000 hab au Léman (les besoins journaliers moyens oscillent entre 400 et 500 L/hab/j)</p>
Interactions physiques et récréatives avec les grands lacs	Recreation and ecotourism (MEA), physical and psychological experiences (IPBES)	Morphologie du lac, de ses berges et des paysages autour, pente et relief de la cuvette lacustre offrant des points de vue, espèces cibles de la pêche de loisir, espèces d'intérêt patrimonial, climat, caractéristiques visuelles, olphactives des plans d'eau	Pratiques socio-culturelles utilisant le lac comme support, comme décors ou les deux	<p>Bénéfices : capacité d'accès aux ressources procurant des revenus et conduisant au bien-être ; opportunités d'extérioriser les valeurs récréatives et beautés écologiques liées aux écosystèmes ; opportunité d'extérioriser les valeurs culturelles et spirituelles liées aux écosystèmes ; opportunité d'observer, d'étudier et de découvrir les valeurs cachées des écosystèmes.</p> <p>Bénéficiaires : riverains et touristes ; pêcheurs de loisir, chasseurs et institutions associées ; prestataires touristiques ; centre de loisirs ; restaurateurs, hôteliers ; collectivités territoriales et services portuaires ; fabricants et vendeurs de matériel. À titre d'exemple, on compte 2 800 bateaux de plaisance sur le lac du Bourget, 2 000 au lac d'Annecy, 11 000 au Léman (50% de la flotte du bassin Rhône-Méditerranée).</p>

Tableau 4 – Application de la cascade à trois SE des grands lacs alpins.

et peut aider à construire sur cette base une nouvelle génération d'indicateurs de services et de suivi des grands lacs alpins.

Appliqué à un espace géographique lacustre spécifique, le modèle de la cascade permet d'identifier les facteurs sociaux, écologiques, endogènes et exogènes au système et les chaînes causales qui modifient la dynamique des SE. Il est ainsi possible d'envisager des diagnostics globaux des territoires limniques sur des problématiques interactives, multi-usages, multi-polluants, multi-bénéficiaires. Certains auteurs mettent en avant que ce type d'analyse est à développer en complément, voire en cadrage à la place des études d'impacts classiques (Liu *et al.*, 2007).

L'application du modèle de la cascade des SE des grands lacs pourrait faciliter le développement d'une gestion plus intégratrice : la prise en compte du système lacustre à gérer, comme un socio-écosystème produisant des SE, oblige à une analyse intégrée des relations société – grand lac et pousse les gestionnaires à s'intéresser aux pratiques et processus sociaux, aux fonctionnements écologiques extérieurs à leurs domaines de compétences, avant la détermination d'objectifs de gestion d'un écosystème (Biggs *et al.*, 2010). Ce point se révèle particulièrement important pour analyser les impacts locaux des changements globaux (réchauffement climatique, eutrophisation...) et des transformations sociétales (évolution des modes de vie, innovations techniques et apparitions de nouvelles pratiques) (Science for Environment Policy, 2015). Réciproquement, les lacs répondent aux changements socio-écosystémiques et peuvent servir de sentinelles aux changements régionaux (Carpenter *et al.*, 2007), voire globaux (Jenny *et al.*, 2020) ou à l'interaction « local / global » (Perga *et al.*, 2016).

Le cadre conceptuel est adapté au contexte des grands lacs anthropisés, associés à des territoires situés en zone développée, définissant ainsi une variété de SE, acteurs et enjeux. L'état et le fonctionnement actuel du système modélisé présentent dès lors des spécificités qui dépendent de l'histoire récente (évolutions des modes de vie, usages et cycles pollution-restauration), des caractéristiques limnologiques (très influencées par le temps de séjour des eaux), et du développement socio-économique régional. Il s'agit en général, comme nos grands lacs alpins de référence, de lacs dont les systèmes de gestion sont bien structurés et où plusieurs atteintes à la qualité des eaux et du milieu ont déjà été traitées avec plus ou moins de succès. Hors de ce contexte strict, l'extension du modèle à d'autres lacs serait envisageable moyennant quelques adaptations. Celles-ci sont limitées quand il s'agit simplement de tenir compte de la variabilité de certaines composantes (par exemple existence ou non de pêche professionnelle) tout en restant dans la même gamme de contraintes liées au climat, au développement socio-économique et la même zone de développement.

Dans d'autres cas plus éloignés, il s'agirait de redévelopper plus en profondeur le modèle pour rendre compte de spécificités majeures dues par exemple aux conditions biophysiques (ex. : taille et forme du lac, lac de barrage), socio-économiques (ex. : pays en voie de développement) et culturelles (valeurs culturelles et rapports à la nature, poids des traditions, lacs utilisés par des populations autochtones). Ce type de caractéristiques suppose des adaptations au niveau de certaines composantes du modèle et leur organisation. La question de la forme du lac fournit une bonne illustration d'une situation complexe engendrée par un paramètre a priori simple. Les objets d'étude nous ayant servi de référence présentent une forme relativement régulière, ovoïde, d'où une faible variabilité spatiale des habitats, de la biodiversité, de la qualité des eaux et des SE. Dans le cadre d'écosystèmes équivalents mais compartimentés et formés de « sous-lacs différenciés » par leur qualité d'eau, usages, habitats, acteurs etc., l'application du cadre conceptuel supposerait de décrire des sous-modèles géographiques et le couplage global entre eux. La difficulté majeure résulterait probablement d'une multiplication et d'une imbrication complexe des aires de fourniture, de demande en SE et des domaines de l'action. La taille du lac serait un autre paramètre géomorphologique d'importance ; les petits lacs possédant moins de SE, voire peuvent être mono-usages pour les plus petits d'entre eux (ex. : lacs de montagne), ce qui limite l'intérêt de l'application du modèle de la cascade.

2 – Analyse spatiale des SE des grands lacs alpins

Afin de formaliser et structurer les études des SE aquatiques et des territoires limniques, les adaptations du modèle de la cascade de Potschin et Haines-Young (2011) répondent à la nécessité de prise en compte des caractéristiques spécifiques non seulement de la masse d'eau et de son écosystème, mais aussi des usages, de l'attractivité sociale et des composantes socio-économiques des territoires limniques. L'une des particularités de ces objets est de spatialiser les processus écologiques et sociétaux associés aux SE des grands lacs selon trois ensembles géographiques du plan d'eau : (1) les milieux écologiques benthiques, littoraux, pélagiques et de surface où sont fournis les SE des lacs, (2) « l'aire d'influence du lac », associée à celui-ci par des flux socio-économiques, culturels et humains et qui représente l'espace *in situ* (ex. : zones navigables), sur les pourtours (ex. : plages sur le littoral) et à l'aval où s'exprime la demande en SE, (3) le BV, origine de l'essentiel des flux de matières polluantes et de ce fait, soumis à des contraintes de développement visant le maintien ou la restauration de la qualité des eaux produites. Un dernier espace englobant ces trois ensembles correspond à l'échelle du « socio-écosystème lacustre », lui-même influencé

par des forçages biophysiques (ex.: réchauffement climatique), réglementaires (ex.: normes européennes, directive-cadre sur l'eau) ou sociétaux (ex.: évolution des modes de vie). Cet « emboîtement » d'échelles et de processus biophysiques et socio-économiques est représentatif de la complexité des territoires limniques et des difficultés de leur modélisation et de *monitoring*. En représentant cet ensemble par un schéma structuré autour des SE fournis par les grands lacs, le modèle de la cascade cherche à réduire ces difficultés. Il ouvre la voie de l'étude, voire de la cartographie de ces différentes aires pour représenter spatialement les territoires limniques et les SE.

3 – L'importance de l'accessibilité aux SE

En analysant les interdépendances dynamiques entre les écosystèmes lacustres et leurs bénéficiaires, l'adaptation du modèle de la cascade permet de faciliter le tri et la synthèse des multiples informations nécessaires à l'étude des SE dans une optique opérationnelle. Elle permet notamment de considérer à la fois les pressions issues des forçages et du BV sur la fourniture en SE, celles induites par l'exploitation des SE du plan d'eau, et d'envisager les conséquences de ces pertes sur la demande et sur les bénéficiaires. Ce modèle invite alors à considérer les interactions et rétroactions positives et négatives dans une approche systémique et intégrée. De plus, la notion « *d'accessibilité aux SE* » permet d'envisager la capacité des bénéficiaires à adapter leurs pratiques pour assurer leur bien-être (ex.: reports spatiaux - *spillover*, reports de pratiques, reports d'espèces) et ainsi d'analyser le fonctionnement du système comme étant en permanence dynamique. L'enjeu de cette prise en compte est d'anticiper les risques pouvant accentuer la pression sur la fourniture en SE ou la reporter sur d'autres espaces et espèces.

L'intégration des pratiques, techniques et aménagements d'accès aux SE permet d'étudier une composante modifiable du socio-écosystème lacustre à gérer. L'accessibilité aux SE se situant à l'interface entre la fourniture et la demande, elle représente un moyen concret pour équilibrer la demande à la capacité de fourniture des écosystèmes. Cela nous amène en partie à répondre à une critique souvent exprimée que le concept de SE est difficile à rendre opérationnel (Barnaud *et al.*, 2011). Cet ajout invite également les sciences humaines et sociales à s'emparer de ce concept, jusqu'à maintenant principalement investi par l'écologie et l'économie (Brunet, 2016), il ouvre alors la porte à l'étude de l'aménagement du territoire, au droit d'accès aux rives (Nikolli, 2021, dans ce même numéro) et aux pratiques sociales en lien avec les SE, sujets d'étude majeurs de la géographie ou encore de la sociologie.

L'étude de l'accès aux SE permet notamment d'envisager des formes de cartographie des SE, de cartographie participative avec les acteurs des territoires limniques, où ces infrastructures ou espaces de pratiques représenteraient les « *nœuds et espaces géographiques* » à l'interface entre la fourniture et la demande et qu'il est possible de représenter sur une carte. Des métriques spatiales pourraient également être utilisées pour définir des indicateurs de services hybrides informant des processus biophysiques et socio-économiques complexes associés aux SE.

4 – Dynamiques des perturbations des SE mises en avant dans le modèle de la cascade et enseignements pour la gestion des grands lacs

Le modèle de la cascade fournit quelques résultats opérationnels à propos des mécanismes de perturbations des SE. Ceux-ci mettent en jeu des trajectoires de pression et d'impacts, pouvant devenir irréversibles à certaines étapes. Deux grandes trajectoires d'impacts peuvent se distinguer en fonction des perturbations. Le cas le plus complexe s'observe dans le cadre de perturbations capables de se généraliser à l'ensemble du plan d'eau et affecter toutes les fonctions écosystémiques. Cette trajectoire met en jeu quatre étapes successives : (1) dans un premier temps, le système lacustre tamponne les perturbations, par exemple l'excès de charge en phosphore est éliminé par les processus biogéochimiques associés aux fonctions de régulation, (2) puis, la capacité de charge de l'écosystème étant dépassée, une altération ou un effondrement de certaines fonctions écosystémiques des lacs sont mesurés (par des indicateurs associés à chaque fonction, voir tableau 1), (3) il en résulte une dégradation de la fourniture en SE de régulation, (4) rapidement, des effets s'observent ou sont mesurés sur les SE d'approvisionnement (perte de bio-ressources, dégradation de la qualité de l'eau potable, risques sanitaires) et le SE culturel « loisirs » (apparition de nuisances visuelles, risques sanitaires), (5) et si rien n'est fait, le « SE image » du lac est affecté et peut modifier en profondeur les représentations du territoire limnique. À terme, cette dernière atteinte risque de provoquer une baisse d'attractivité et une diminution globale de la demande en SE. À noter que la réversibilité des dégradations est de plus en plus difficile et coûteuse à mettre en place au fil de cette trajectoire, d'où la nécessité d'identifier le plus rapidement ces phénomènes et de les anticiper. Certaines perturbations comme l'eutrophisation et le réchauffement climatique suivent cette trajectoire d'impact. L'histoire des grands lacs alpins depuis le début du XX^e siècle en fournit un bon exemple (Baulaz, 2020).

D'autres pressions, comme celles générées par les micropolluants ou pollutions métalliques, ont eu une dynamique différente. Il s'agit de menaces capables de remettre en cause brutalement l'exploitation locale ou globale de certains SE d'approvisionnement et culturels (disservices), sous contrainte du dépassement de normes sanitaires souvent évolutives. Ce type de pollutions, dans les niveaux habituels de concentration, reste largement en deçà des seuils de toxicité pour la biodiversité et n'affectent pas de façon reconnue les fonctions écosystémiques (fonctions de production, d'habitat). Les effets ne sont pas visibles sur l'écosystème dans l'état des connaissances actuelles, les conséquences pouvant pourtant être dramatiques sur la santé humaine à faible dose (Loizeau *et al.*, 2013). L'identification de ces perturbations ne peut alors se faire que par des mesures de suivi des polluants classés à risque dans la chair des poissons, dans la colonne d'eau (certains produits ne devraient pas s'y retrouver) et dans les sédiments. Les contaminations aux micropolluants plastiques et médicamenteux sont les principales préoccupations du Léman pour les années à venir en matière de pollution (CIPEL, 2018 et 2019).

En termes d'enseignements, cela suggère que la gestion doit se doter d'un système d'indicateurs de l'état du territoire limnique qui puisse éclairer les prises de décisions et anticiper les impacts des perturbations sur les SE. Sur ce point, les grands lacs alpins français font figure d'exemples grâce au nombre important d'indicateurs suivis et l'étendue temporelle des données disponibles². Cependant, ces indicateurs sont, pour la grande majorité, de nature biophysique et visant d'une part, à mesurer des flux hydrochimiques entre le BV et le lac et d'autre part, le fonctionnement et l'état de l'écosystème lacustre. Mais cela n'est pas suffisant car seule la comparaison des informations sur l'état des habitats, de la biodiversité et du bien-être humain pourra renseigner la gestion sur les tendances d'évolution des SE dans le futur, l'identification préventive des tensions qui pourraient survenir entre la fourniture, l'accès et la demande en SE. Cela suggère qu'un suivi qualitatif des pratiques et des représentations socio-culturelles des lacs et un suivi quantitatif de l'évolution du nombre de bénéficiaires des SE doivent venir compléter les observatoires des grands lacs alpins.

Une deuxième évolution envisageable consisterait à revoir l'espace géographique de suivi des lacs, actuellement basé sur une étude des lacs et leur BV (Bartout, 2015). Cette échelle ne permet pas la prise en compte des processus socio-économiques et culturels relatifs à la demande en SE, qui pourtant déterminent la qualité et la quantité des habitats naturels et des services rendus. Prendre en compte une aire plus vaste et être capable d'anticiper les menaces qui pèsent sur le territoire limnique sont indispensables. Les

observatoires doivent en conséquence être en mesure de suivre un ensemble d'indicateurs biophysiques et socio-économiques sur l'espace «influençant» le lac et les SE (le plan d'eau, son littoral, le BV), et l'espace «influencé par» l'écosystème lacustre (l'aire de répartition des bénéficiaires des SE). Cette recommandation permettrait d'élargir l'échelle de gestion des grands lacs, condition nécessaire pour faire face aux enjeux à venir, notamment posés en termes de risques associés à la quantité d'eau, la multiplicité des menaces induites par l'évolution des usages (Pflieger et Brethaut, 2012; Bartout et Touchart, 2017; CIPEL, 2019). L'adaptation du modèle de la cascade, en permettant une analyse fine des composantes des SE pourrait être développée en tant qu'outil de dialogue permettant d'engager cette réflexion entre chercheurs, acteurs de la société civile et gestionnaires. La cartographie d'indicateurs de fourniture, de demande et d'accès aux SE pourrait être un second outil pour repenser l'observatoire des grands lacs alpins.

L'adaptation du modèle de la cascade pour étudier les SE des grands lacs représente alors une clé de lecture des territoires limniques, à la fois **inclusive**, c'est-à-dire prenant en compte la multiplicité des acteurs et intérêts, **intégrée** en permettant d'étudier des socio-écosystèmes complexes dans une approche pluridisciplinaire, mais également **appliquée** car le modèle peut fournir de nouveaux arguments en faveur de la conservation et pour repenser la gouvernance des grands lacs alpins. Bien que peu mobilisé par la géographie, ce concept nous semble efficace pour questionner les rapports humains – nature, les jeux d'échelle dans les processus écosystémiques et sociétaux et pour soutenir l'évolution de la discipline qui est de plus en plus appliquée (Arnauld de Sartre et Gagnol, 2012). Cela étant, toute application de ce concept n'est pas neutre : cette clé de lecture est orientée, elle véhicule une vision anthropocentrée, critiquable et critiquée de la Nature (Dufour *et al.*, 2016). Le risque sous-jacent est une modification des représentations de la Nature en ne s'intéressant qu'aux valeurs tangibles et utiles aux humains (Maris, 2018). La géographie, en tant que science d'interface, a la capacité d'analyser les valeurs à la fois tangibles, monétaires, écologiques mais également sociales et culturelles liées aux SE. Elle peut alors limiter ce risque et considérer une gamme de dépendances la plus complète des sociétés à la nature, rendant prévisibles les conséquences non désirées des actions des humains sur les écosystèmes.

CONCLUSION

Comprendre comment les grands lacs «rendent des services» à la société est une tâche qui va bien au-delà d'un inventaire des usages. À la lumière des observations présentées ici, il apparaît que (1) les services écosystémiques (SE) ne sont pas des invariants ni du système écologique, ni du système humain, (2) les impacts sur l'écosystème lacustre ne se répercutent pas de la même façon sur tous les SE, (3) la prise en compte de l'accès aux SE permet d'envisager les adaptations des pratiques par les bénéficiaires et les pressions qui peuvent en résulter, et dans le même temps (4) l'accès peut conditionner le niveau de certains SE et représente un moyen d'action de la gestion des grands lacs.

Étudier les SE des grands lacs demande donc la prise en compte et l'analyse d'une multitude de facteurs déterminants pour le fonctionnement des territoires qui produisent ces services: propriétés physiques, hydrologiques, biologiques des plans d'eau et leur bassin-versant (BV), de l'ensemble des usages et pratiques, et également des représentations et valeurs socio-culturelles associées aux grands lacs. Ces caractéristiques sont évolutives dans le temps et l'espace, chacune avec sa variabilité spécifique.

L'adaptation de l'un des modèles conceptuels parmi les plus utilisés pour étudier les SE aujourd'hui (le modèle de la cascade) permet de construire un cadre théorique et méthodologique pour appliquer le concept de SE en tenant compte des spécificités fonctionnelles et géographiques des grands lacs alpins français (le lac

d'Annecy, le lac du Bourget) et le Léman. La prise en compte des liens et rétroactions entre les composantes du socio-écosystème associés aux grands lacs permet d'envisager de nouvelles façons de comprendre, monitorer et gérer les relations entre les grands lacs et la société.

Parmi les adaptations réalisées sur ce modèle, la prise en compte des pratiques, techniques et des aménagements mobilisés pour accéder et tirer profit des SE représente une évolution importante au concept. Ces informations aident à analyser et anticiper les tensions véhiculées par des besoins croissants en matière de qualité et quantité de ressources lacustres face à des écosystèmes affaiblis par les effets cumulés des perturbations passées et des pressions à venir.

Cette approche autour des SE des grands lacs alpins représente donc une piste intéressante pour que les sciences humaines et sociales s'emparent pleinement du concept et interrogent la gestion et le monitoring des grands lacs alpins. L'utilisation du modèle de la cascade nous invite notamment à questionner l'échelle de gestion de ces écosystèmes, actuellement basée sur celle du plan d'eau et du BV, souvent critiquée dans la littérature scientifique, et à considérer à la fois «l'espace influençant» le lac et les SE d'un point de vue biophysique (le BV) et «l'espace influencé» par le lac de manière socio-économique et culturelle et culturelle, autrement dit, l'espace où se situe la société qui bénéficie des écosystèmes lacustres.

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'ensemble des experts scientifiques et les personnes impliquées dans la gestion des grands lacs alpins pour le partage de leur expertise ainsi que Dr Prigent, ancien médecin généraliste dont le cabinet se situait au bord du Léman et qui nous a éclairés sur les questions de «lacs et santé».

NOTES

- ¹ Règlement d'application des accords du 20 avril 1982 entre le Gouvernement de la République française et le Conseil Fédéral suisse concernant la pêche dans le lac Léman
- ² Observatoire des Lacs Alpins - www.inrae.fr

BIBLIOGRAPHIE

- ALA-HULKKO T., KOTAVAARA O., ALAHUHTA J., HELLE P. et HJORT J., 2016. Introducing accessibility analysis in mapping cultural ecosystem services. *Ecological Indicators*, 66, 416-427.
- AMIGUES J. et CHEVASSUS-AU-LOUIS B., 2011. Évaluer les services écologiques des milieux aquatiques : enjeux scientifiques, politiques et opérationnels. Paris, ONEMA, INRA, 174 p.
- ARNAULD DE SARTRE X. et GAGNOL L., 2012. Les échelles des territorialités. *Géographie et Cultures*, 81, 10.
- ARNAULD DE SARTRE X., HUBERT B. et BOUSQUET F., 2015. Introduction. À la recherche des concepts heuristiques sur les relations natures/sociétés. *Natures Sciences Sociétés*, 23 (2), 154-156.
- AZNAR-SANCHEZ J. A., VELASCO-MUÑOZ J. F., BELMONTE-UREÑA L. J. et MANZANO-AGUGLIARO F., 2019. The worldwide research trends on water ecosystem services. *Ecological Indicators*, 99, 310-323.
- BACHELARD G., 1942. L'eau et les rêves : essai sur l'imagination de la matière. Paris, José Corti, 265 p.
- BAGUET R. et KLEIN A., 2015. Quelles sont les ressources des grands lacs ? In B. MONTUELLE et A. CLÉMENS (dir.), Le tour des grands lacs alpins naturels en 80 questions. Villeurbanne, Zone atelier bassin du Rhône et Observatoire des lacs alpins, GRAIE, 95-118.
- BARNAUD C., ANTONA M. et MARZIN J., 2011. Vers une mise en débat des incertitudes associées à la notion de service écosystémique. *VertigO*, 11 (1), 29 p.
- BARTOUT P., 2015. L'incompréhension de la place prise par les plans d'eau dans l'Union européenne et ses conséquences réglementaires. *Noroi*, 235, 17-36.
- BARTOUT P. et TOUCHART L., 2017. Le territoire limnique, une alternative à la gouvernance des plans d'eau par masses d'eau ? *VertigO*, 17 (3), 38 p.
- BAULAZ Y., 2020. Évolution des socio-écosystèmes des grands lacs alpins et leurs services écosystémiques à l'épreuve des pollutions. Thèse de géographie, Université Savoie Mont Blanc, 480 p.
- BIGGS R., WESTLEY F. R. et CARPENTER S. R., 2010. Navigating the back loop: Fostering social innovation and transformation in ecosystem management. *Ecology and Society*, 15(2), 28.
- BOYD J. et BANZHAF S., 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 63 (2-3), 616-626.
- BRUNET L., 2016. Faire l'expérience des «services écosystémiques». *Carnets de géographes*, 9, 19.
- BURKHARD B., KROLL F., NEDKOV S. et MÜLLER F., 2012. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 21, 17-29.
- BURKHARD B. et MAES J., 2017. Mapping Ecosystem Services. Sofia, Pensoft Publishers, 373 p.
- BUSH M., GEE K., BURKHARD B., LANGE M. et STELLJES N., 2011. Conceptualizing the link between marine ecosystem services and human well-being: The case of offshore wind farming. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, 7 (3), 190-203.
- CARPENTER S. R., BENSON B. J., BIGGS R., CHIPMAN J. W., FOLEY J. A., GOLDING S. A., HAMMER R. B., HANSON P. C., JOHNSON P. T. J., KAMARAINEN A. M., KRATZ T. K., LATHROP R. C., MCMAHON K. D., PROVENCHER B., RUSAK J. A., SOLOMON C. T., STANLEY E. H., TURNER M. G., VANDER ZANDEN M. J., WU C. H. et YUAN H., 2007. Understanding regional change: A comparison of two lake districts. *Bioscience*, 57 (4), 323-335.
- CARPENTER S. R. et COTTINGHAM K. L., 1997. Resilience and restoration of lakes. *Ecology and Society*, 1 (1), 1-16.
- CASTRO A. J., VERBURG P. H., MARTIN-LOPEZ B., GARCIA-LORENTE M., CABELLO J., VAUGHN C. C. et LOPEZ E., 2014. Ecosystem service trade-offs from supply to social demand: A landscape-scale spatial analysis. *Landscape and Urban Planning*, 132, 102-110.
- COSTANZA R., D'ARGE R., DE GROOT R., FARBER S., GRASSO M., HANNON B., LIMBURG K., NAEEM S., O'NEILL R. V., PARUELO J., RASKIN R. G., SUTTON P. et VAN DEN BELT M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387 (6630), 253-260.
- COSTANZA R., FISHER B., MULDER K., LIU S. et CHRISTOPHER T., 2007. Biodiversity and ecosystem services: A multi-scale empirical study of the relationship between species richness and net primary production. *Ecological Economics*, 61 (2-3), 478-491.
- COSTANZA R., DE GROOT R., BRATT L., KUBISZEWSKI I., FIORAMONTI L., SUTTON P., FARBER S. et GRASSO M., 2017. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 28, 1-16.
- COSTANZA R., DE GROOT R., SUTTON P., VAN DER PLOEG S., ANDERSON S. J., KUBISZEWSKI I., FARDER S. et TURNER R. K., 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26 (1), 152-158.

- CRISTOFINI B., ROYBIN D. et ETAIX F., 1989. Caractériser le développement régional, est-ce parler de sa qualité? une typologie des 128 cantons des Alpes du Nord. *Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 23, 23-44.
- DE GROOT R., 2005. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 75 (3-4), 175-186.
- DE GROOT R., BRANDER L., VAN DER PLOEG S., COSTANZA R., BERNARD F., BRAAT L., CHRISTIE M., CROSSMAN N., GHERMANDI A., HEIN L., HUSSAIN S., KUMAR P., McVITTIE A., PORTELA R., RODRIGUEZ L. C., TEN BRINK P. et VAN BEUKERING P., 2012. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 1 (1), 50-61.
- DE GROOT R. S., WILSON M. A. et BOUMANS R. M. J., 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41, 393-408.
- DUFOUR S., ARNAULD DE SARTRE X., CASTRO M. et OSZWALD J., 2016. Origine et usages de la notion de services écosystémiques : éclairages sur son apport à la gestion des hydrosystèmes. *VertigO, Hors-série*, 25, 1-20.
- FISHER B. et TURNER R. K., 2008. Ecosystem services : Classification for valuation. *Biological Conservation*, 141 (5), 1167-1169.
- FORBES S. A., 1887. The lake as a microcosm. Ré-ed. 1925, *Illinois Natural History Survey Bulletin*, 15 (9), 537-550.
- FOREL F. A., 1904. Le Léman. Monographie limnologique. Lausanne, F. Rouge, 576 p.
- FROSSARD V., GOULON C., GUILLARD J., HAMELEET V., JACQUET S., LAINE L., RIMET F. et TRAN-KHAC V., 2018. Suivi de la qualité des eaux du lac d'Annecy. Annecy, Thonon - SILA, INRA, 122 p.
- GAGNAIRE L., 1988. Rôle de la pêche française au Léman dans l'économie locale du Chablais. Rapport Institut de Limnologie. 93 p.
- HACKBART V. C. S., DE LIMA G. T. N. P. et DOS SANTOS R. F., 2017. Theory and practice of water ecosystem services valuation : Where are we going? *Ecosystem Services*, 23, 218-227.
- HOLZER J. M., ADAMESCU M. C., GONET-GARCIA F. J., DIAZ-DELGADO R., DICK J., GROVE J. M., ROZZI R. et ORENSTEIN D. E., 2018. Negotiating local vs global needs in the International Long Term Ecological Research Network's Socio-Ecological Research Agenda. *Environmental Research Letters*, 13 (10), 14 p.
- JACQUET S., ANNEVILLE O. et DOMAIZON I., 2012. Évolution de paramètres clés indicateurs de la qualité des eaux et du fonctionnement écologique des grands lacs péri-alpins (Léman, Annecy, Bourget) : Étude comparative de trajectoires de restauration post-eutrophisation. *Archives des Sciences*, 65 (1-2), 191-208.
- JACQUET S., BRIAND J. F., LÉBOULANGER C., AVOIS-JACQUET C., OBERHAUS L., TASSIN B., VINÇON-LIETE B., PAOLINI G., DRUART J. C., ANNEVILLE O. et HUMBERT J. F. 2005. The proliferation of the toxic cyanobacterium *Planktothrix rubescens* following restoration of the largest natural French lake (Lac du Bourget). *Harmful Algae*, 4 (4), 651-672.
- JENNY J.-P., ANNEVILLE O., BAULAZ Y., BOUFFARD D., DOMAIZON I., BOCANIOV A., CHEVRE N., DITTRICH M., DORIOZ J.-M., DUNLOP E., DUR G., GUILLARD J., GUINALDO T., JACQUET S., JAMONEAU A., JAWED Z., JEPPESEN E., KRANTZBERG G., LENTERS J., LEONI B., MEYBEECK M., NAVA V., NOGES T., NOGES P., PATELLI M., PEBBLES V., PERGA M.-E., RASCONI S., RUETZ C., RUDSTAM L., SALMASO N., SAPNA S., STRAILE D., TAMMEORG O., TWISS M. R., UZARSKI D. G., VENTELA A.-M., VINCENT W. F., WILHEM S. W., WANGBERT S.-A. et WEYHENMEYER G. A., 2020. Scientist' Warning tu Humanity: Rapid Degradation of the World's Large Lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 46 (4), 686-702.
- JENNY J.-P., 2013. Réponses des grands lacs périalpins aux pressions anthropiques et climatiques récentes : reconstitutions spatio-temporelles à partir d'archives sédimentaires. Thèse des sciences de la terre, Université Grenoble Alpes, 248 p.
- KEELER B. L., POLASKY S., BRAUMAN K. A., JOHNSON K. A., FINLAY J. C., O'NEILL A., KOVACS K. et DALZELL B., 2012. Linking water quality and well-being for improved assessment and valuation of ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109 (45), 18619-24.
- LA NOTTE A., D'AMATO D., MÄKINEN H., PARACCHINI M. L., LIQUETTE C., EGOH B., GENELETTI D. et CROSSMAN N., 2017. Ecosystem services classification : A systems ecology perspective of the cascade framework. *Ecological Indicators*, 74, 392-402.
- LIKENS G. E., 1984. Beyond the shoreline : a watershed-ecosystem approach. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 22 (1), 1-22.
- LINDEMAN R. L., 1942. The Trophic-Dynamic Aspect of Ecology. *Ecology*, 23 (4), 399-417.
- LIU J., DIETZ T., CARPENTER S. R., ALBERTI M., FOLKE C., MORAN E., PELL A. N., DEADMAN P., KRATS T., LUBCHENCO J., OSTROM E., OUYANG Z., PROVENCHER W., REDMAN C. L., SCHNEIDER S. H. et TAYLOR W. W., 2007. Complexity of Coupled Human and Natural Systems. *Science*, 317 (5844), 1513-1516.

- LOIZEAU J. L., EDDER P., DE ALENCASTRO L. F., CORVI C. et RAMSEIER GENTILE S., 2013. La contamination du Léman par les micropolluants Revue de 40 ans d'études. *Archives des Sciences*, 66 (2), 117-136.
- MAGNI D. et CHINAGLIA N., 2007. Alpine Lakes. A common approach to the characterization of lakes and their catchment area. Alpine Lakes Network (Interreg III B "Alpine Space"), 241 p.
- MARIS V., 2018. La part sauvage du monde - penser la nature dans l'Anthropocène. Paris, Le Seuil, 272 p.
- MERAL P. et PESCHE D., 2016. *Les services écosystémiques: repenser les relations nature et société*. Versailles, QUAE, 304 p.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA), 2005. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, DC, Island Press, 137 p.
- MONTUELLE B. et CLÉMENS A., 2015. Le tour des grands lacs alpins naturels en 80 questions. Villeurbanne, Zone atelier bassin du Rhône et Observatoire des lacs alpins, GRAIE, 205 p.
- MOSS B., 2008. Approaches to Ecosystem services assessment in freshwater ecosystems. In GRANT F., YOUNG J., HARRISON P., SYKES M., SKOURTOS M., ROUNSEVELL M., KLUVÁNKOVÁ-ORAVSKÁ T., SETTELE J., MUSCHE M., ANTON C. et WATT A. (dir.), *Ecosystem Services and Drivers of Biodiversity Change*. Report of the RUBICODE e-conference, April 2008. En ligne sur le site de rubicode.net, 25-26.
- NAHLIK A. M., KENTULA M. E., FENNESSY M. S. & LANDERS D. H., 2012. Where is the consensus? A proposed foundation for moving ecosystem service concepts into practice. *Ecological Economics*, 77, 27-35.
- NIKOLLI A., 2018. Les rives lacustres comme espaces publics: essai de cartographie. L'exemple du lac d'Annecy. *Mappemonde*, 123, 22 p.
- OSTROM E., 2009. A general framework for analyzing sustainability of Social-Ecological Systems. *Science*, 325 (5939), 419-422.
- PERGA M.-E., PIGNOL C. et NAFRECHOUX E., 2016. Global Biogeochemical Cycles dioxide concentration of lakes. *Global biogeochem. Cycles*, 30, 93-104.
- PFLIEGER G. et BRETHAUT C., 2012. GOUVRHONNE: Gouvernance transfrontalière du Rhône, du Léman à Lyon. Genève: OFEV, DREAL Rhône Alpes, Agence de l'eau RMC, SIG, Canton de Genève, Canton de Vaud, EDF, 218 p.
- POTSCHIN M.B. & HAINES-YOUNG R.H., 2011. Ecosystem services: Exploring a geographical perspective. *Progress in physical geography*. 35, 575-594.
- POURRIOT R. et MEYBECK M. (dir.), 1995. *Limnologie générale*. Paris, Milan, Barcelone, Masson, 956 p.
- ROCHER P., GEIZENDORFFER M., LEVREL H. et MARIS V. (dir.), 2016. Valeurs de la biodiversité et services écosystémiques: Perspectives interdisciplinaires. Versailles, Quae, 220 p.
- STEINMAN A. D., CARDINALE B. J., MUNNS W. R., OGDahl M. E., ALLAN J. D., ANGADI T., BARTLETT S., BRAUMAN K., BYAPPANAHALLI M., DOSS M., DUPONT D., JOHNS A., KASHIAN D., LUPI F., MCINTYRE P., MILLER T., MOORE M. MUENICH R. L., POUDEL R., PRICE J., PROVENCHER B., REA A., READ J., RENZETTI S., SOHNGEN B. et WASHBURN E., 2017. Ecosystem services in the Great Lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 43 (3), 161-168.
- STERNER R. W., KEELER B., POLASKY S., POUDEL R., RHUDE K. et ROGERS M., 2020. Ecosystem services of Earth's largest freshwater lakes. *Ecosystem Services*, 41, 11 p.
- TOUCHART L., 2000. Qu'est-ce qu'un lac? *Bulletin de l'association de géographes français*, 4, 313-322.
- VAN DER PLOEG S., DE GROOT R. S. et WANG Y., 2010. The TEEB Valuation Database - a searchable database of 1310 estimates values of ecosystem services. Final report, Foundation for Sustainable Development, Wageningen, The Netherlands, 134 p.
- VAN OUDENHOVEN A. P. E., PETZ K., ALKEMADE R., HEIN L. et DE GROOT R., 2012. Framework for systematic indicator selection to assess effects of land management on ecosystem services. *Ecological Indicators*, 21, 110-122.
- VERNEX J.-C., 1998. Qu'est-ce qu'un lac? De l'imaginaire lacustre à l'aménagement. *Le Globe*, 138 (1), 7-16.

Sources

- CIPEL, 2018. Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique. Disponible sur le site www.cipel.org
- CIPEL, 2019. Vision Léman 2030. Disponible sur le site www.cipel.org
- CISALB, 2011. Contrat de bassin versant du lac du bourget. Disponible sur le site www.gesteau.fr
- EFESE, 2019. Les milieux humides et aquatiques continentaux français: messages clés à l'attention des décideurs. Disponible sur le site www.ecologie.gouv.fr
- IPBES, 2018a. The assessment report on land degradation and restoration - summary for policymakers. Disponible sur le site ipbes.net
- IPBES, 2018b. The methodological assessment report on scenarios and models of biodiversity and ecosystem services. Disponible sur le site ipbes.net

SCIENCE FOR ENVIRONMENT POLICY, 2015. Ecosystem Services and Biodiversity. Report n11, produced for the European Commission, DG Environment by the Science Communication Unit, UWE, Bristol. Disponible sur le site ec.europa.eu

SERENA, 2012. Mesures agro-environnementales et Paiements pour services environnementaux.

Services environnementaux et usages de l'espace rural, repères pour l'action, fiche 7. Disponible sur le site gred.ird.fr

TEEB, 2010. L'économie des écosystèmes et de la biodiversité. 15^e colloque de l'association de comptabilité nationale. Disponible sur le site doc.teebweb.org